

Erstellen eines Energieverteilungskonzepts für einen autonomen Mondlandedemonstrator

Bachelorarbeit



Elektrotechnik - Elektrische Energiesysteme

Christian Strowik

Mat.Nr.: 50 24 124

Erstprüfer:	Prof. Dr.-Ing. Reinhard Geyer
Zweitprüfer:	Prof. Dr. Folker Renken
Betreuer am Institut:	Dipl.-Ing. Fred Ohlendorf

Erklärung

Hiermit erkläre ich, die Bachelor-Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt zu haben. Außerdem befinden sich in diesem Dokument keine DLR-internen Zeichnung, Schaltpläne o. Ä., die nicht für die Öffentlichkeit bestimmt sind.

Christian Strowik

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
2. Theorie	3
2.1. Akkumulatoren auf Lithium-Basis	3
2.1.1. Lade- und Entladeverhalten	4
2.1.2. Ladetechnik	5
2.2. Abwärtswandler	6
3. Environment for Autonomous GNC Landing Experiments	11
4. Aufgabenbeschreibung und Zeitplanung	13
5. Energieverteilungskonzept	17
5.1. Ermittlung der Leistungsaufnahme aller elektrischen Komponenten	17
5.2. Akkumulatoren	17
5.2.1. Auswahl der Akkutechnologie	18
5.2.2. Laden der Akkumulatoren	20
5.2.3. Über-/Unterspannungsprotektion	24
5.2.4. Balancing der Akkumulatoren	27
5.2.5. Ladezustandsanzeige	30
5.2.6. Zusammenschalten der Komponenten	34
5.3. Layout und Position der Platinen	34
5.4. Anschluss an die Bodenstation	36
5.5. Grounding-Konzept	37
6. Mechanisches Konzept	41
6.1. Auswahl der Steckverbinder	41
6.2. Design des Anschlusspanels	43
6.3. Anordnung der Komponenten	44
7. Testen der Komponenten	47
8. Schlussbetrachtung	53
Literaturverzeichnis	55

Inhaltsverzeichnis

A. Anhang	57
A.1. 7.4 V Platine	58
A.2. 14.8 V Platine	65
A.3. 22.2 V Platine (PC)	74
A.4. 22.2 V Platine (Turbine)	82
A.5. 33.3 V Platine	91

Abbildungsverzeichnis

2.1. Prinzip eines Lithium-Ion Akkumulators [11]	4
2.2. Typische Entladekennlinie eines Lithium-Polymer-Akkus	5
2.3. Typische Ladekennlinie eines Lithium-Polymer-Akkus	6
2.4. Grundidee eines Abwärtswandlers	7
2.5. Idealwerte der Diodenspannung und des Spulenstroms im eingeschwungenen Zustand	7
2.6. Realer Abwärtswandler	8
3.1. Aktuelles Strukturkonzept des EAGLE [15]	11
4.1. Zeitplanung	14
5.1. Einfache Ladeschaltung für LiPo-Akkus	21
5.2. Laderegler für den 7.4 V Akku	25
5.3. Laderegler für den 33.3 V Akku	26
5.4. Über-/Unterspannungsprotektion für den 7.4 V Akku	28
5.5. Balancer für eine Zelle	29
5.6. Ladezustandsanzeige über die Akkuspannung	31
5.7. Entladekennlinien des Kokam 7.4 V/3600 mAh	33
5.8. Schematische Darstellung der 7.4 V-Akku Subsystemzusammenschaltung .	34
5.9. Vier Vorschläge für eine Akkuhalterung	35
5.10. Akkuhalterung mit aufgesetzter Platine	36
5.11. Konzept zur Verbindung mit der Bodenstation	37
5.12. Auslösecharakteristiken einiger ausgewählten Sicherungen [7]	39
6.1. Anschlussschema	42
6.2. Konzeptzeichnung des Anschlusspanels	44
6.3. Anordnung der Peripherie auf der Elektronikplatte	45
7.1. Frontpanel mit 7.4 V Akku und dazugehöriger Elektronik	48
7.2. Ladezyklus am Kokam 7.4 V/3600 mAh	48
7.3. Balancingvorgang am Kokam 7.4 V/3600 mAh	49
7.4. Mittelwert des Stroms während des Einschaltens	50
7.5. Ladestrom und Spulenspannung im eingeschwungenen Zustand	50
7.6. Mittelwert des Stroms während des Einschaltens	51
A.1. Entladekennlinie des SLS 22.2 V/2650 mAh	57

Abbildungsverzeichnis

A.2. Top-Layer der 7.4 V-Platine	58
A.3. Bottom-Layer der 7.4 V-Platine	58
A.4. Schaltpläne der 7.4 V Platine	59
A.5. Entladekennlinie des Conrad Energy 14.8 V/3300 mAh	66
A.6. Top-Layer der 14.8 V-Platine	67
A.7. Bottom-Layer der 14.8 V-Platine	67
A.8. Schaltpläne der 14.8 V Platine	68
A.9. Top-Layer der 22.2 V-PC-Platine	75
A.10. Bottom-Layer der 22.2 V-PC-Platine	75
A.11. Schaltpläne der 22.2 V (PC) Platine	76
A.12. Entladekennlinie des Kokam 22.2 V/2100 mAh	83
A.13. Top-Layer der 22.2 V-Turbinen-Platine	84
A.14. Bottom-Layer der 22.2 V-Turbinen-Platine	84
A.15. Schaltpläne der 22.2 V (Turbine) Platine	85
A.16. Entladekennlinien des myLipo 33.3 V/1000 mAh	91
A.17. Top-Layer der 33.3 V-Platine	92
A.18. Bottom-Layer der 33.3 V-Platine	92
A.19. Schaltpläne der 33.3 V Platine	93

Abkürzungsverzeichnis

AC	Alternating Current
Akku	Akkumulator
BMS	Battery Management System
bspw.	beispielsweise
bzw.	beziehungsweise
C ₆	Graphit
CC	Constant Current
CMOS	Complementary Metal Oxide Semiconductor
CU	Constant Voltage
d. h.	das heißt
DC	Direct Current
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
EAGLE	Environment for Autonomous GNC Landing Experiments
EAGLE	Einfach Anzuwendender Graphischer Layout Editor
GNC	Guidance, Navigation and Control
GPS	Global Positioning System
IC	Integrated Circuit
IP XX	International Protection
k. A.	keine Angaben
LDO	Low-Drop-Out
LED	Light Emitting Diode
Li	Lithium
Li-Ion	Lithium-Ion
LiCoO ₂	Lithium Cobalt Oxid
LiFePO ₄	Lithium-Eisen-Phosphat
LiPo	Lithium-Polymer
LT	Linear Technologie
MOS-FET	metal-oxide-semiconductor field-effect-transistor
NiCd	Nickel-Cadmium
NiMH	Nickel-Metall-Hydrid
NTC	Negative Temperature Coefficient
n. v.	nicht verfügbar
Pb	Blei
TEAMS	Test Environment for Applications of Multiple Spacecraft
TI	Texas Instruments
W-LAN	Wireless-Local Area Network
z. B.	zum Beispiel

Symbolverzeichnis

γ	Tastverhältnis
κ	Leitfähigkeit
A	Fläche
C	Kapazität
D	Diode
E	Energie
I	Strom
L	Induktivität
m	Masse
Q	Ladung/Transistor
R	Widerstand
R'	Widerstandsbelag
S	Schalter
t	Zeit
T	Periodendauer/Temperatur
U	Spannung
\vec{x}	Position

1. Einleitung

Nachdem die Sowjetunion 1957 mit Sputnik 1 den ersten Satelliten in eine stabile Erdumlaufbahn brachten und so das Zeitalter der Raumfahrt einleiteten, ist der Drang nach der Erkundung des Weltraums immer größer geworden. Bereits 1959 machte sich die erste Raumsonde der Welt, Lunik 1, auf den Weg, um Daten über den Mond zu sammeln. Sie verfehlte zwar ihr Ziel, konnte aber trotzdem viele wertvolle Informationen sammeln. Seitdem wurden regelmäßig Sonden ausgesendet, um Informationen über unser Sonnensystem zu sammeln, sei es die Mariner 10, die in die Umlaufbahn des Merkur gelenkt wurde oder die Voyager 2, welche faszinierende Fotos vom Jupiter, Saturn, Uranus und Neptun machte und derzeit durch den Heliosteath fliegt.

Da durch einen Vorbeiflug jedoch nicht alle Fragen, die unsere Planeten aufwerfen, geklärt werden können, schreitet die Entwicklung von Landern - Sonden, die auf fremden Himmelskörpern landen können - voran. Die letzte populäre Mission war die Marssonde Curiosity, die erfolgreich aufsetzte und unter anderem Gas- und Gesteinsproben nahm und analysierte sowie Fotos von der Marsoberfläche machte. Die spannenden Fragen vor der Ankunft war: Wird Curiosity ohne Schäden landen? Wird die autonome Landeregelung funktionieren?

Das DLR Bremen möchte mit dem Projekt EAGLE mithelfen, diese Fragen vor einer Mission zu beantworten. Der EAGLE ist ein autonomer Mondlandedemonstrator, auf dem solche Landeregelungen, wie sie bei Curiosity zum Einsatz kamen, mit Hilfe verschiedener Subsysteme vorab getestet werden können. Da es sich um ein flugfähiges Modell handelt, spielt die Energieversorgung eine große Rolle. An dieser Stelle beginnt diese Arbeit.

Ziel ist es, die Energieversorgung des EAGLE auszulegen, im stationären sowie im autonomen Betrieb. Hierbei spielt die Akkutechnik eine große Rolle. In dieser Arbeit werden drei Akkutechnologien auf Lithiumbasis vorgestellt und verglichen. Diese Technologien sind im Konsumerbereich bereits Standard und zeichnen sich durch ihre hohe Energiedichte aus. Im Bezug auf das EAGLE Projekt sind jedoch einige Sicherheitsfragen zu klären, unter anderem das sichere Laden. Im Konsumerbereich wird für die Sicherheit ein unvollständiger Ladevorgang in Kauf genommen, was im EAGLE Projekt aufgrund diverser Faktoren nicht hingenommen werden kann. Es gilt somit eine Energieverteilung aufzubauen, die die benötigte Leistung über Akkumulatoren bereitstellt aber auch vollständig ausnutzt.

2. Theorie

Im Folgenden werden die Grundlagen zu den in dieser Arbeit behandelten Lithium Akkumulatoren und Tiefsetzstellern erläutert.

2.1. Akkumulatoren auf Lithium-Basis

Seitdem immer mehr Geräte für den mobilen Bereich entwickelt werden, steigt auch der Bedarf an möglichst leichten, aber dennoch energiereichen Akkumulatoren. Lithium ist daher als Aktivmaterial ideal, da es mit 0.53 g/cm^3 das leichteste Metall ist und mit -3.05 V ein sehr hohes Standardpotential aufweist. Seit den 1960er Jahren wird deshalb mit Lithium als Anodenmaterial experimentiert, auch weil das Vorkommen in der Erdrinde groß ist und sich nicht nur auf einzelne Erdregionen beschränkt. Die Entwicklung von wiederaufladbaren Zellen scheiterte bis in die 1980er Jahre hinein, da vor allem die Dendritenbildung nicht unterbunden werden konnte. Bei der Dendritenbildung lagert sich das gelöste Lithium bei der Wiederaufladung nicht mehr an der gleichen Stelle wie vorher ab, sondern es kommt zu einer Art Gebirgsform. An manchen Stellen bilden sich regelrechte Bergspitzen (Dendriten), die sogar durch den Separator zur positiven Elektrode wachsen und somit Kurzschlüsse erzeugen konnten. Durch diese Kurzschlüsse bestand die Gefahr, dass das Lithium schmilzt und mit dem Elektrolyt ein entzündliches Gemisch bildet. Die ersten Lithium-Akkus hatten somit nicht nur eine geringe Zyklenzahl, sondern bildeten auch ein Sicherheitsrisiko.

Die Lösung des Sicherheitsproblems ergab sich durch das Einbringen eines chemisch stabileren Elektrodenmaterials, z. B. LiCoO_2 (Lithium-Cobaltoxid). In ihren Kristallgittern werden die Lithium-Atome eingelagert, bleiben jedoch innerhalb des Gitters beweglich. Diese Konstellation stellt den Pluspol des Akkus dar. Minusseitig wird C_6 (Graphit) benutzt. Diese Zusammenstellung ist seit den ersten Tests bis heute die Standardkonfiguration eines Lithium-Ion Akkus. Beim Laden eines Lithium-Ion Akkus werden dem Pluspol Elektronen entzogen, die von den Li-Atomen abgegeben werden. Dadurch werden sie zu Li^+ -Ionen, die vom Minuspol angezogen werden und somit durch den Separator wandern. Dort lagern sie sich an den Graphitschichten ab und werden durch die Rücknahme des fehlenden Elektrons wieder zu Lithium-Atomen. Beim Entladen verläuft dieser Prozess umgekehrt. Minusseitig oxidieren die Li-Atome und geben ein Elektron ab, wodurch sie wieder zu Li^+ -Ionen werden. Die Elektronen wandern durch den geschlossenen Stromkreis zurück zum Pluspol, die Li^+ -Ionen nehmen die kurzen Weg durch den Separator zurück und werden wieder als Li-Atome eingelagert. In Abbildung 2.1 ist dieser Vorgang schematisch dargestellt.

Seitdem die Sicherheit der Lithium-Akkus durch das Trennen des Lithiums vom

2. Theorie

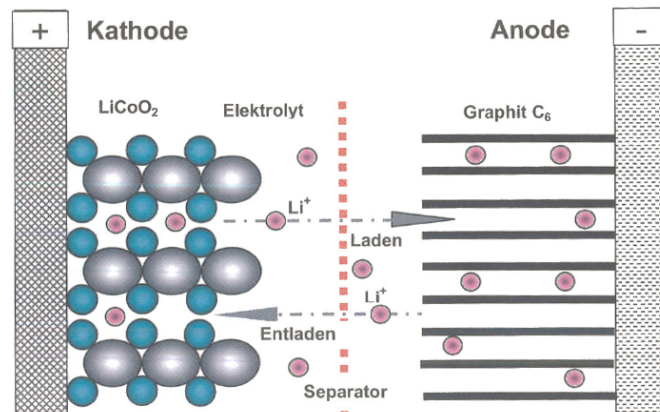


Abbildung 2.1.: Prinzip eines Lithium-Ion Akkumulators [11]

Elektrolyt und diverser Schutzbeschaltungen geklärt ist, schreitet die Entwicklung schnell voran. Die meisten mobilen Geräte benutzen Lithium-Ionen- oder Lithium-Polymer-Akkus, da die Energiedichte mit $160\text{-}200\text{ mAh/g}$ sehr groß ist.

2.1.1. Lade- und Entladeverhalten

Die Ladeschlussspannung von Lithium-Polymer Akkus liegt bei 4.2 V , die Entladeschlussspannung bei 3 V . Nennspannung beträgt 3.7 V . Die Tiefentladungszone beginnt bei 2.5 V , in der irreversible Schäden auftreten. Bei Lithium-Akkus macht sich diese falsche Behandlung durch eine Reaktion bemerkbar, bei der ein Gas entsteht, welches den Akku aufbläht.

Die Angabe des maximal entnehmbaren Stroms wird durch einen Multiplikator und die Kapazität angegeben. Meist befinden sich auf den Akkus Angaben wie „ $25\text{C}/50\text{C}$ “. Der erste Wert steht dabei für die maximale Dauerbelastung, der zweite für die maximale Impulsbelastung. Das C steht für die Kapazität des Akkus. Hat ein Akku bspw. eine Kapazität von 3600 mAh und die Angabe „ $25\text{C}/50\text{C}$ “, berechnen sich die Ströme mit

$$25 \cdot 3600\text{ mA} / 50 \cdot 3600\text{ mA} = 90\text{ A} / 180\text{ A} \quad (2.1)$$

„ $25\text{C}/50\text{C}$ “ sind typische Angaben für den Entladestrom. Der Ladestrom ist sehr viel niedriger und liegt im Bereich von 1C - 2C .

An Lade- und Entladeschlussspannung fällt die große Spannungsdifferenz auf. Die dazugehörige Kennlinie weist im ersten und letzten Bereich starke Knicke auf. Während des Entladens fällt die Zellenspannung nur über einen sehr geringen Spannungsbereich recht linear ab, in Abbildung 2.2 sind die vorher genannten Effekte gut zu erkennen. Außerdem sieht man, dass eine genaue Ladezustandsmessung über Spannung durch den nicht linearen Verlauf sehr schwer ist. Dazu kann es bei manchen Akkus im ersten Drittel der Entladekennlinie zu einem „Spannungssack“ kommen. An dieser Stelle der Kennlinie bildet sich ein Tal aus, in dem die Spannung etwas absackt, sich danach dann aber wieder erhöht.

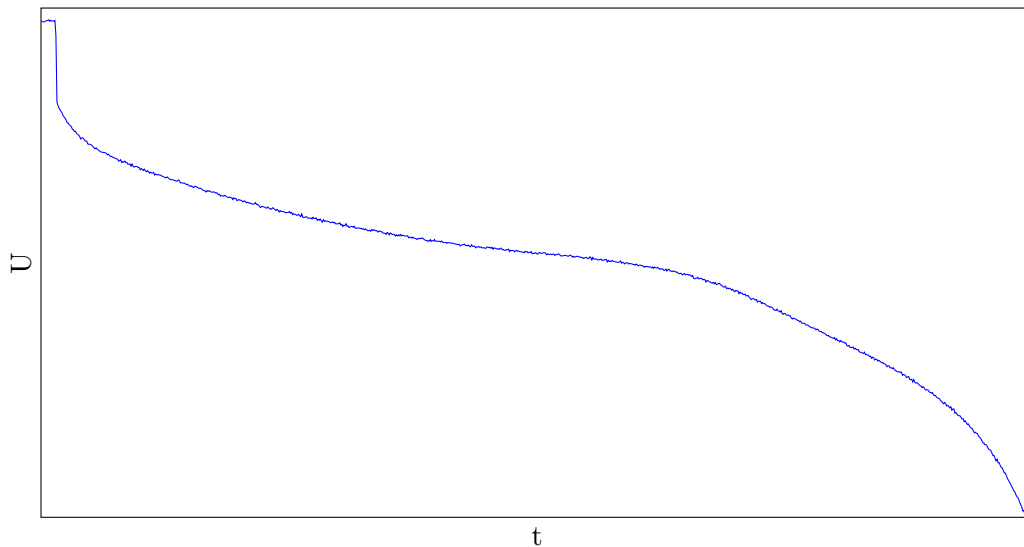


Abbildung 2.2.: Typische Entladekennlinie eines Lithium-Polymer-Akkus

2.1.2. Ladetechnik

Das Laden von Lithium-Akkumulatoren wird durch die geringe Fehlertoleranz der Akkutechnologie erschwert. Überladung muss in jedem Fall vermieden werden. Im Gegensatz zu anderen Akkus wie z. B. Bleiakkus, die überschüssige Energie in Wärme umsetzen, nehmen Lithium-Akkus weitere Energie auf und speichern diese auch. Dabei kann keine Reaktion wie z. B. Erwärmung festgestellt werden, die Überladung bleibt somit unbemerkt. Im Überladungsbereich setzen jedoch sofort chemische Reaktionen ein, z. B. ein zu hoher Entzug von Lithium der positiven Elektrode, wodurch diese instabil werden kann.

Lithium-Akkus werden nach dem Constant Current/Constant Voltage-Verfahren (CC/CU-Verfahren) geladen. Zuerst fließt ein konstanter Strom durch den Akku, bis die Ladeschlussspannung von 4.2 V erreicht ist. Zu diesem Zeitpunkt ist der Akku noch nicht komplett geladen, daher wird die Spannung auf Höhe der Ladeschlussspannung angelegt, wodurch der Strom durch die Zelle nach einer e-Funktion abnimmt. Liegt der Ladestrom nahe 0 A gilt der Akku als geladen. Dieser Verlauf ist in Abbildung 2.3 zu sehen.

Eine weitere Schwierigkeit tritt bei mehrzelligen Lithium-Akkus durch den Zellendrift auf. Durch mehrfaches Laden und Entladen driftet die Spannung der Zellen durch ihre unterschiedlichen Innenwiderstände auseinander. Tritt das Ladegerät in den CU-Bereich ein, liegt am Akku die Ladeschlussspannung von z. B. 8.4 V bei einem Zweizellen-Akku an. Die Einzelzellenspannung kann jedoch an Zelle 1 bei 4.1 V und Zelle 2 bei 4.3 V liegen, also deutlich überladen. Das Ladegerät kann diesen Fehler nicht erkennen. Darum ist es nötig, jede Zelle einzeln zu überwachen und Schutzmaßnahmen zu ergreifen, um das Driften der Zellen auszugleichen. Im Regelfall werden dazu Balancer oder Equalizer benutzt. Voraussetzung ist, dass der Akku einen sogenannten Balancer-Anschluss besitzt, d. h. es gibt einen Stecker, wo jeder Zellenkontakt einzeln herausgeführt ist.

2. Theorie

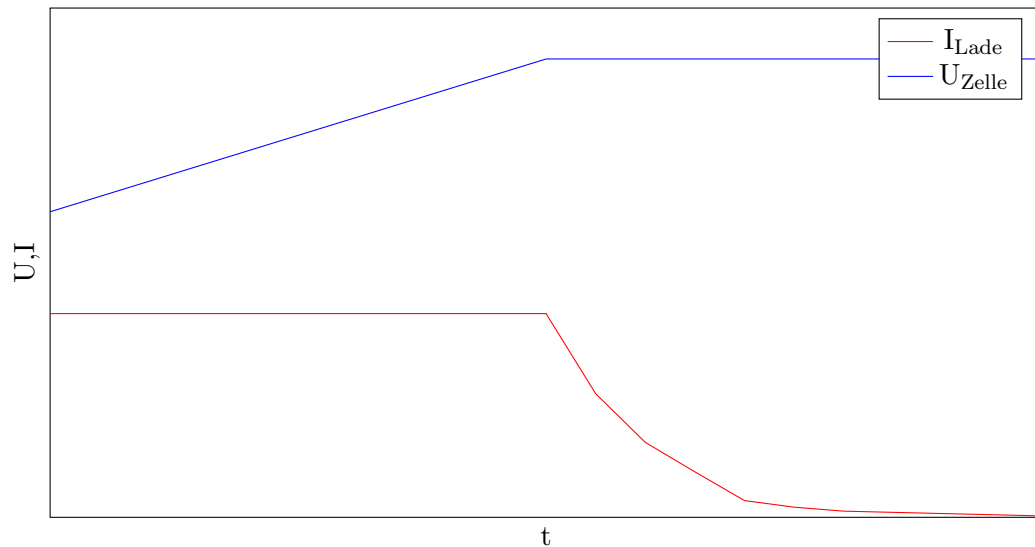


Abbildung 2.3.: Typische Ladekennlinie eines Lithium-Polymer-Akkus

Ein Balancer überwacht die Zellenspannung. Überschreitet diese einen gewissen Grenzwert, wird parallel zu dieser Zelle ein Lastwiderstand geschaltet, der den Ladestrom an der Zelle vorbeiführt und in Wärme umwandelt. Langsam werden somit die Zellen angeglichen.

Ein Equalizer arbeitet komplexer, aber auch effizienter. Er überwacht wie der Balancer die Zellenspannung. Wird diese überschritten, wird der Ladestrom nicht durch einen Lastwiderstand an der Zelle vorbeigeführt, sondern zwischengespeichert und in eine andere Zelle umgeladen. Das Balancieren der Akkus geht somit schneller und es treten weniger Verluste auf.

2.2. Abwärtswandler

Zum Laden der Akkumulatoren wird ein IC benutzt, welches als Tiefsetzsteller arbeitet. Bei dieser Schaltung ist die Eingangsspannung immer höher als die Ausgangsspannung. Dies hat zur Folge, dass die angelegte Ladespannung höher sein muss, als die Ladeschlussspannung des Akkumulators.

Das Wirkprinzip ist in Abbildung 2.4 dargestellt. Zur besseren Erläuterung werden alle Bauteile als ideal angesehen. Wird der Schalter S geschlossen, fließt ein Strom aus der Quelle durch die Induktivität L , die Kapazität C und die Last zurück zur Quelle. Die Spannung $U_D = U_e$ und der Strom I_L steigt an. Wird nun der Schalter wieder geöffnet, fließt der Strom I_L weiter, getrieben von der Induktivität L und schließt sich über die Diode D . Die Spannung U_D beträgt diesmal 0 V und I_L sinkt wieder.

Real werden Tiefsetzsteller mit Transistoren bzw. MOS-FETs wie in Abbildung 2.6 aufgebaut. Q_1 ersetzt den Schalter S und Q_2 die Diode D aus Abbildung 2.4. Das

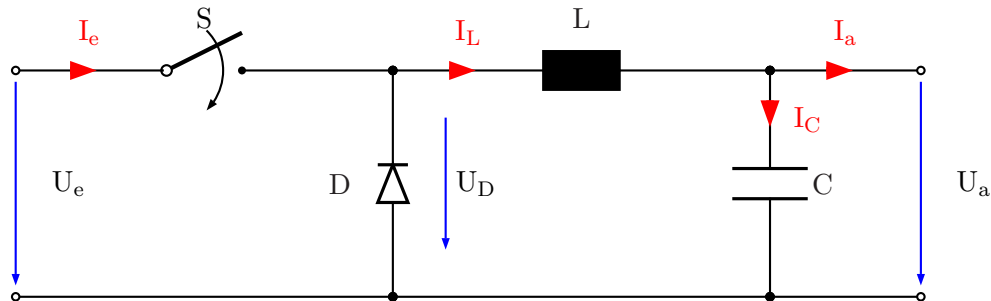


Abbildung 2.4.: Grundidee eines Abwärtswandlers

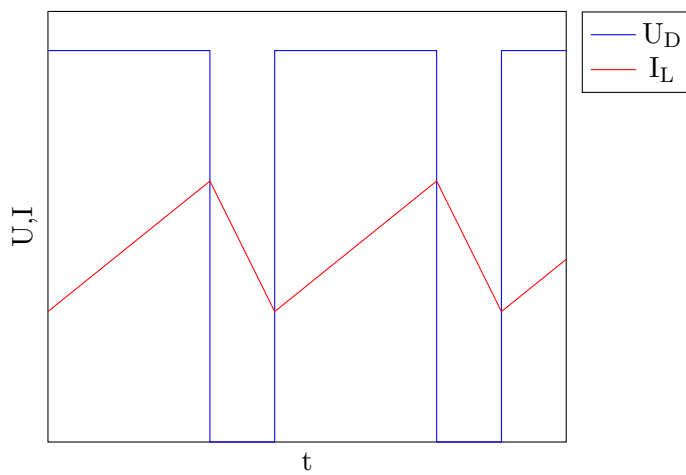


Abbildung 2.5.: Idealwerte der Diodenspannung und des Spulenstroms im eingeschwungenen Zustand

2. Theorie

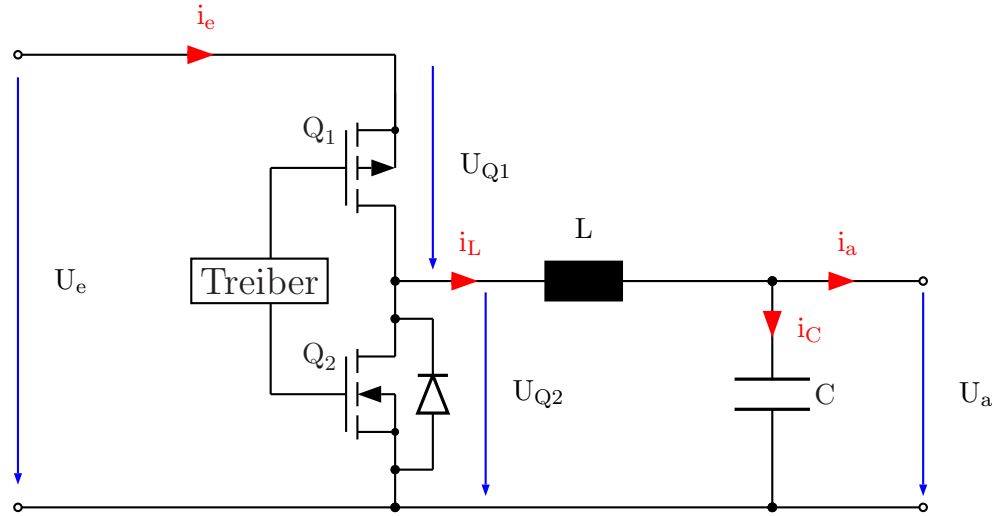


Abbildung 2.6.: Realer Abwärtswandler

Funktionsprinzip ist das gleiche, zuerst wird Q_1 leitend und prägt dadurch einen Strom in L ein. Dann wird Q_1 hochohmig und Q_2 wird leitend, wodurch sich L über der Last und C entlädt. Die Schaltgeschwindigkeit der MOS-FETs liegt bei mehreren kHz. Der Treiber misst dabei Strom und Spannung und regelt diese Größen, indem das Tastverhältnis zwischen Q_1 und Q_2 angepasst wird. Die Ausgangsspannung lässt sich somit durch folgende Gleichungen beschreiben:

$$\gamma = \frac{t_{\text{ein}}}{T} \quad (2.2)$$

$$\gamma \cdot T \cdot (U_e - U_a) = (1 - \gamma) \cdot T \cdot U_a \quad (2.3)$$

$$\Rightarrow U_a = \gamma \cdot U_e \quad (2.4)$$

Durch das Austauschen des Schalters und der Diode durch MOS-FETs sind sehr viel höhere Schaltfrequenzen möglich. Außerdem besitzen sie einen sehr geringen Widerstand zwischen Drain und Source (R_{DSon}) während sie leiten. Dies ist auch der Grund, warum die Diode D durch den MOS-FET Q_2 ausgetauscht wurde. Ist Q_2 leitend, fällt eine Spannung an ihm ab, der abhängig vom R_{DSon} ist. Dieser liegt aktuell im Bereich weniger $\text{m}\Omega$, abhängig von der Fertigungstechnologie. Die Schaltfrequenz der MOS-FETs ist ausschlaggebend für die Verlustleistung. Je höher die Frequenz, desto höher die Verluste durch das Umladen der Gatekapazitäten. Zudem spielt die Flankensteilheit eine große Rolle, die Spannung am Gate sollte innerhalb weniger ns umgeschaltet werden. Meistens wird zwischen dem Schalten eine kurze Pause eingefügt, in der keiner der beiden MOS-FETs leitet. Ansonsten könnte es zu der Situation kommen, dass der eine MOS-FET

2.2. Abwärtswandler

noch nicht hochohmig ist und der andere gerade niederohmig wird. Je nachdem, wie groß der R_{DSon} der beiden MOS-FETs zu dem Zeitpunkt ist, könnten erhebliche Ströme, praktisch Kurzschlussströme, fließen.

3. Environment for Autonomous GNC Landing Experiments

Das „Environment for Autonomous GNC Landing Experiments“ (EAGLE) ist ein reines Studentenprojekt. Ziel ist es, einen Flugkörper zu entwickeln, mit dem es möglich ist, Landealgorithmen für spätere Missionen auf fremden Himmelskörpern zu testen. In Abbildung 3.1 ist das aktuelle Strukturkonzept zu sehen. Dort kann man erkennen, dass der EAGLE aus sehr leichten Materialien gebaut wird. Um ohne Fluggenehmigung zu testen, muss das Gewicht unter 25 kg liegen, darüber würde der EAGLE als Drohne gelten.

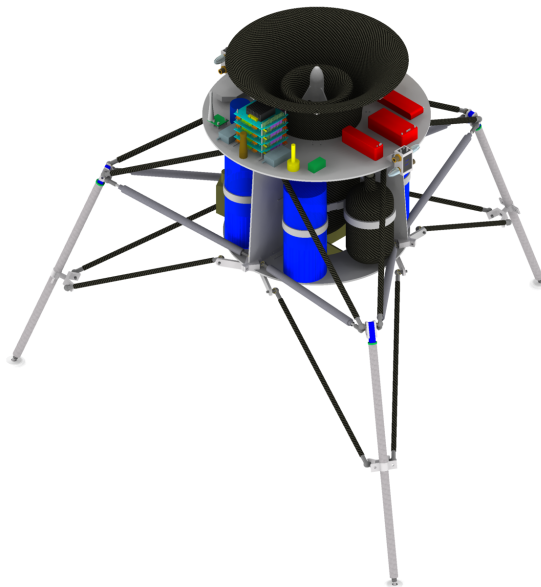


Abbildung 3.1.: Aktuelles Strukturkonzept des EAGLE [15]

Angetrieben wird der EAGLE von einer Turbine und mit Hilfe einer Schubvektorsteuerung gesteuert. Zwei Servomotoren schwenken dazu zwei Metallplatten im Turbinenstrahl, um den EAGLE in die gewünschte Richtung zu lenken. Außerdem befindet sich ein Kaltgassystem mit an Bord. Über vier Ventile kann dieses Gas ausgestoßen werden, wodurch, je nachdem welche Ventile geöffnet werden, ein Drehmoment entsteht. Dieses Drehmoment wird dazu benutzt, die Rotation des EAGLEs zu verhindern.

Weiterhin befinden sich zur Steuerung und Navigation ein GPS-Empfänger, ein WLAN-Modul, ein Laseraltimeter und ein Barometer mit an Bord. Außerdem stehen drei

3. Environment for Autonomous GNC Landing Experiments

Temperatursensoren zur Verfügung. Die Daten, die von dieser Peripherie ausgehen, laufen an einem zentralen Punkt, dem EAGLE-Board, zusammen. Dieses Board wird angetrieben von einem STM32-Mikrocontroller, der die Daten aufbereitet und zur Weiterverarbeitung an einen Navigationsrechner weiterleitet. Hervorgegangen ist das EAGLE-Board aus der Diplomarbeit von Michael Stämmler im Jahr 2010. Außerdem gibt es eine Bodenstation, an die ausgewählte Datenpakete vom EAGLE per WLAN gesendet werden.

Zur Sicherheit soll es möglich sein, den EAGLE im Handbetrieb zu steuern. Sollte ein Algorithmus nicht wie geplant funktionieren oder andere schwere Systemfehler auftreten, kann über eine Fernsteuerung die Kontrolle übernommen werden.

4. Aufgabenbeschreibung und Zeitplanung

Folgende Arbeiten müssen in diesem Projekt erledigt werden:

1. stationärer Betrieb
 - 1.1. Konzept zum Anschluss des EAGLE an eine Bodenstation
 - 1.2. Konzept zur Energieversorgung der Peripherie durch die Bodenstation
 - 1.3. Konzept zum Laden der Akkumulatoren
 - 1.3.1. Laderegler
 - 1.3.2. Balancer
 - 1.3.3. Über-/Unterspannungsprotektion
 - 1.3.4. Ladezustandsanzeige
 - 1.4. Grounding-Konzept
2. autonomer Betrieb
 - 2.1. Auswahl einer geeigneten Akkutechnologie
 - 2.2. Spannungshaltung auf allen Spannungsebenen
3. mechanisches Konzept
 - 3.1. Design eines Anschlusspanels
 - 3.2. Anordnung aller elektronischen Bauteile auf der Elektronikplattform

Die Spezifikationen aus Tabelle 4.1 sollen dabei eingehalten werden. Außerdem soll auf die Verwendung von Mikrocontrollern verzichtet werden. Ziel ist es, die Energieverteilung autonom arbeiten zu lassen und im Falle eines Defektes schnell austauschen zu können.

Zur Erleichterung der Arbeit wurde eine detaillierte Zeitplanung aufgestellt. Diese ist in Abbildung 4.1 zu sehen. Die meiste Zeit ist für die Entwicklung und das Layouten der Platinen eingeplant, da es sich hier um den anspruchsvollsten und umfangreichsten Teil handelt.

4. Aufgabenbeschreibung und Zeitplanung

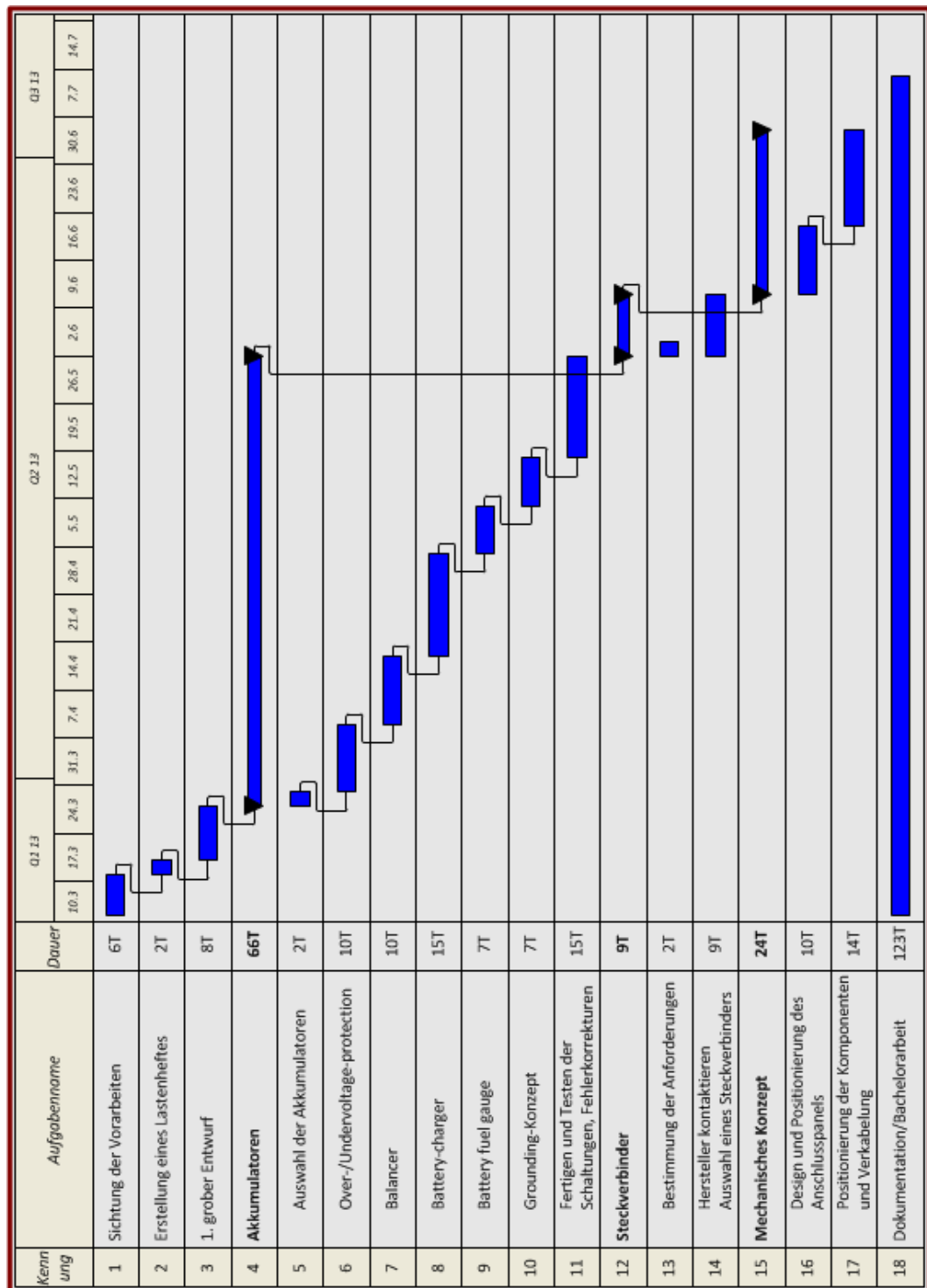


Abbildung 4.1.: Zeitplanung

Nr	Anforderung	Grenzwert	Wunschwert
1	maximale Verluste durch Steckverbinder und Zu- leitung	5 %	
2	maximale Steck- und Zugkraft des Steckverbin- ders	50 Nm	
3	minimale Entfernung der Bodenstation vom EAGLE	30 m	≥ 50 m
4	minimale Laufzeit des Rechners im Akkubetrieb	30 min	60 min
5	minimale Laufzeit der restlichen Komponenten im Akkubetrieb	10 min	30 min
6	Maximalgewicht der Komponenten auf der E- Plattform	3134 g	
7	Leistungsaufnahme aller zusätzlichen Schaltun- gen	10 W	
8	geringe Verschiebung des Schwerpunkts	1 cm	0.5 cm

Tabelle 4.1.: Grenzwerte der Anforderungen

5. Energieverteilungskonzept

Im folgenden Kapitel wird das Energieverteilungskonzept und die Entwicklung dorthin vorgestellt.

5.1. Ermittlung der Leistungsaufnahme aller elektrischen Komponenten

In Tabelle 5.1 sind die Leistungen der einzelnen Komponenten aufgelistet. Dabei handelt es sich um die Angaben aus den Datenblättern. Für die Magnetventile ist eine höhere Spannung vorgesehen als im Datenblatt angegeben. Dies liegt vor allem am verwendeten Druck des Rohrleitungssystem. Tests haben gezeigt, dass die Ventile bei Nennspannung nicht schnell genug und nicht komplett öffnen. Bei 33 V erfüllten die Ventile die Anforderungen. Die Gleichung

$$I = 0.0163 \cdot U \frac{1}{\Omega} - 0.0532 \text{ A} \quad (5.1)$$

beschreibt den Strom bei unterschiedlichen Spannungen [12].

Die Leistungsaufnahme der Turbinen und des EAGLE-Boards wurden zudem selber ermittelt. Das EAGLE-Board ist eine Eigenentwicklung des DLR, daher lagen keine Daten dazu vor. Die Turbinen hingegen übersteigen vor allem im Anlauf sämtliche Herstellerangaben, weshalb auch hier eigene Messungen vorgenommen wurden. Außerdem steht noch nicht fest, welche der beiden Turbinen letztendlich im EAGLE verbaut wird, daher muss das Konzept mit beiden Varianten kompatibel sein.

Bei der Sichtung der benötigten Elektronik fiel eine Servoansteuerung auf, die jedoch nur eine Spannungsverstärkung vornahm. Angesteuert wurde sie über das EAGLE-Board. Da die benutzten Servomotoren digital arbeiten, ist eine Spannungsverstärkung unnötig, der Ausgang des EAGLE-Boards kann direkt mit den Servomotoren verbunden werden. Ein Test zeigte, dass dies auch in der Praxis funktioniert. Die Platine mit der Servoansteuerung konnte somit entfernt werden, was weiteren Platz auf der Elektronikplattform freigab.

5.2. Akkumulatoren

Im Folgenden wird die Auswahl der Akkutechnologie und deren Lade- sowie Schutzschaltungen diskutiert und konzipiert. Die kompletten Schaltpläne befinden sich im Anhang.

5. Energieverteilungskonzept

Nr.	Komponente	Leistungsaufnahme	Spannung
1	MSM200S	5 V/6 W	22.2 V per DC/DC-Wandler
2	WI232	3.3 V/16...24 mA	22.2 V per LDO
3	EAGLE Board	8 W	22.2 V
4	Parallax SCP1000	3.3 V/25 μ A	22.2 V per LDO
5	IMU05 minIMU	5 V/0.3 A	22.2 V per DC/DC Wandler
6	ILR 1020	24 V/3 W	22.2 V
7	HMC5843	3.3 V/0.8 mA	22.2 V per LDO
8	HV 6818	7.4 V/4.59 A	7.4 V Akku
9	Magnetventile	24 V/0.34 A	33.3 V
10	Schubert-Turbine	24 V/100 A	22.2 V Akku
11	AMT-Turbine	14.8 V/30 A	14.8 V Akku

Tabelle 5.1.: Leistungsverbrauch der Peripherie laut Datenblättern

Akkumulatortechnik	U_{Nenn} (V)	U_{min} (V)	U_{max} (V)	Energiedichte (Wh/kg)
Pb	2	1.7	2.4	30-50
NiCd	1.2	0	n. d.	40-60
NiMH	1.2	0.8	n. d.	60-80
Li-Ion	3.6	2.5	4.1	120-210
LiPo	3.7	2.5	4.2	140
LiFePO ₄	3.3	2.5	3.6	90-110

Tabelle 5.2.: Auflistung der möglichen Akkutechnologien

5.2.1. Auswahl der Akkutechnologie

Die Auswahl an Akkumulatortypen ist sehr groß (siehe Tabelle 5.2). Jedoch sind nicht alle Typen für den EAGLE nutzbar. Zum einen müssen hohe Ströme geliefert werden können, zum anderen muss das Gewicht möglichst gering sein. Außerdem spielt die Sicherheit eine gewisse Rolle. Da die Akkus durch einen Absturz mechanisch oder durch eine falsche Behandlung (Tiefentladung) beschädigt werden können, sollte der ausgewählte Akkutyp zumindest einen gewissen Grad an Brandsicherheit besitzen.

Wird die Schubert-Turbine verbaut, sind drei Spannungsebenen (7.4 V, 22.2 V und 33.3 V) nötig, mit der AMT-Turbine sogar vier (zusätzlich 14.8 V). Im Modellbau haben sich Akkus auf Lithium-Basis durchgesetzt, weshalb viele der verwendeten Komponenten mit dem Spannungsbereich dieses Akkutyps kompatibel sind. Außerdem ist die Energiedichte und Nennspannung von Akkumulatoren anderer Technologie im Vergleich zu Lithium-Akkus sehr gering. Aus diesen Gründen hat man sich darauf geeinigt, Akkus auf Lithium-Basis zu verwenden.

Auf Lithium-Basis gibt es drei führende Technologien: Li-Ion, LiPo und LiFePO₄.

Li-Ion würde sich durch die hohe Nennspannung und Energiedichte anbieten. Die Brandgefahr bei Beschädigung ist durch das flüssige Elektrolyt jedoch sehr groß, auch

durch Überladung oder Tiefentladung kann es schnell zu einem Brand kommen. Zum mechanischen Schutz müsste eine Halterung gebaut werden, die den Akku vor Schäden bewahrt. Diese Konstruktion würde sehr massiv und schwer werden. Aufgrund dieser hohen Empfindlichkeit gegenüber falscher Behandlung und der massiven Halterung wurde vom Li-Ion-Akku abgesehen.

LiFePO₄ besticht durch eine hohe Sicherheit. Da das Elektrolyt ein Feststoff ist, ist ein thermisches Durchgehen des Akkus fast ausgeschlossen. Hohe Dauerentladeströme wie sie für die Turbine benötigt werden, sind auch möglich. Jedoch ist die Nennspannung sehr viel geringer als bei Li-Ion, weshalb meistens eine Zelle mehr eingeplant werden muss. Dazu kommt die etwas niedrigere Energiedichte als bei den anderen beiden Technologien, weshalb sich das Gesamtgewicht nochmals erhöht. Aufgrund dieser Tatsachen wurde von der Verwendung von LiFePO₄-Akkus Abstand genommen.

LiPo-Akkus sind der gute Mittelweg aus den beiden anderen Technologien Li-Ion und LiFePO₄. Die Energiedichte ist mit ca. 140 Wh/kg ähnlich hoch wie bei Li-Ion, außerdem haben beide Technologien eine ähnliche Nennspannung, wodurch ein Austausch unproblematisch ist. LiPo-Akkus sind in der Lage, hohe Ströme im Bereich von 25C-50C zu liefern, daher eignen sie sich hervorragend für den Turbinenanlauf. Die mechanische Belastbarkeit wurde im Vergleich zu Li-Ion-Akkus durch ein festes Elektrolyt und die Brandgefahr somit verringert (jedoch nicht ausgeschlossen). Meist entsteht nur ein Gas, durch das der Akku aufgebläht wird, oder bei starker mechanischer Beschädigung Rauch entsteht, aber ein Brand beginnt nicht. Aufgrund dieser Eigenschaften fiel die Wahl auf die LiPo-Technologie.

Aus Tabelle 4.1 ist ersichtlich, dass die Komponenten mindestens 10 min und der Rechner mindestens 30 min im Akkubetrieb laufen müssen. Summiert man die Leistungen der Komponenten auf, erhält man für die einzelnen Spannungsebenen folgende benötigten Leistungen:

$$P_{7.4V} = 67.932 W \quad \rightarrow \quad Q_{7.4V} = 9180 \text{ mAh} \quad (5.2)$$

$$P_{14.8V} = 444 W \quad \rightarrow \quad Q_{14.8V} = 30000 \text{ mAh} \quad (5.3)$$

$$P_{22.2V} = 1110 W \quad \rightarrow \quad Q_{22.2V} = 50000 \text{ mAh} \quad (5.4)$$

$$P_{22.2V} = 18.58 W \quad \rightarrow \quad Q_{22.2V} = 840 \text{ mAh} \quad (5.5)$$

$$P_{33.3V} = 85.12 W \quad \rightarrow \quad Q_{33.3V} = 2560 \text{ mAh} \quad (5.6)$$

Die Leistung aus 5.2 wird für die zwei Servomotoren benötigt. Hier wurde vom Hersteller die maximale Stromaufnahme angegeben. Diese tritt auf, wenn das maximale Haltemoment des Servos erreicht wird. Durch mehrere Tests und Berechnungen wurde die Schubvektorsteuerung so konzipiert, dass das maximale Haltemoment nur noch 1/10 des ursprünglichen Wertes entspricht. Durch den linearen Zusammenhang zwischen Haltemoment und Servostrom wurde auch der Servostrom auf 1/10 reduziert. Der Strom, der beim Stellen benötigt wird, bleibt jedoch unverändert, so dass der Akku sicherheitshalber größer ausgelegt wird, um einen möglichst langen Betrieb zu gewährleisten.

Die hohen Leistungen aus 5.3 und 5.4 sind die Startströme der Turbinen. Ein Elektromotor bringt die Turbine auf eine bestimmte Drehzahl und eine Heizkathode wird zum

5. Energieverteilungskonzept

Glühen gebracht. Dann spritzt eine Pumpe das Kerosin ein und die Turbine wird nur noch durch die Verbrennung angetrieben. Die Heizkathode und der Elektromotor werden nicht mehr benötigt, einzig die Pumpe muss weiterarbeiten. Daher kann davon ausgegangen werden, dass während des Fluges der Akku nur wenig belastet wird. Probleme werden sich bei der Verwendung der Schubert-Turbine ergeben. Ursprünglich sollten sich Navigationsrechner und Turbine einen Akku teilen. Der Navigationsrechner wird über einen DC/DC Wandler versorgt, der direkt am Akku angeschlossen ist. Durch den hohen Anlaufstrom der Turbine bricht die Spannung am Akku aber erheblich zusammen und verlässt den Eingangsspannungsbereich des DC/DC Wandlers. Dieser schaltet dadurch ab, wodurch der Navigationsrechner ausfällt. Der Rechner hat jedoch oberste Priorität, er muss durchgängig Daten sammeln und zur Navigation weiterverarbeiten. Um die Spannungshaltung zu gewährleisten, ist es unabdingbar, dass der Turbine ein separater Akku bereitgestellt wird. Dies bringt neben der Spannungshaltung mehrere Vorteile mit sich:

- Störungen des Navigationsrechners und weiterer Sensoren unterbunden
- Aufteilung des Ladestroms auf zwei Akkus mit geringerem Ladestrom
- Laufzeit des Navigationsrechners unabhängig von der Leistungsaufnahme der Turbine
- Laderegler mit geringer Ausgangsleistung sind besser erhältlich

Die Leistung aus 5.6 kann halbiert werden. Insgesamt sind vier Ventile geplant, aufgeteilt in zwei Paare. Die Paare zeigen in entgegengesetzte Richtungen, wodurch diese beim gleichzeitigen Anschalten gegeneinander arbeiten würden. Daher wird immer nur ein Ventil-Paar eingeschaltet.

Mit den oben angesprochenen Informationen und den typischen Größen für LiPo-Akkus ergeben sich die Akkuspannungen und -kapazitäten aus Tabelle 5.3. Mit ihnen ist es möglich, die Mindestlaufzeit aus Tabelle 4.1 sogar auf die Wunschlafzeit zu erhöhen.

Servomotoren	7.4 V	3600 mAh
AMT-Turbine	14.8 V	2100 mAh
Schubert-Turbine	22.2 V	2100 mAh
Peripherie	22.2 V	1500 mAh
Magnetventile	33.3V	1000 mAh

Tabelle 5.3.: Benötigte Akkuspannungen und -kapazitäten

5.2.2. Laden der Akkumulatoren

Das Laden der Akkumulatoren erfolgt über das CC/CU-Verfahren. Da auf Mikrocontroller verzichtet werden soll, muss ein geeigneter stand-alone-Laderegler gefunden werden.

Für die Akkus mit den Spannungen 7.4 V, 14.8 V und 22.2 V wurden mehrere Laderegler von LT und Maxim gesichtet, wobei der MAX745 von Maxim und der LTC4008 von LT in die engere Auswahl fielen. Diese zwei stand-alone-Laderegler bestehen durch eine hohe Effizienz von über 90% und einem hohen maximalen Ladestrom. Der LTC4008 hat sich durch den niedrigeren Stand-by-Strom und eine Selbstabschaltung beim Ausschalten des Ladenetzteils durchgesetzt. Außerdem hat dieser Laderegler einen Pin, über den das IC in den Stand-by-Modus geschickt werden kann, unabhängig vom Ladezustand. Dies ermöglicht eine einfache Abschaltung durch eine andere Schaltgruppe bei Über-/Unterspannung.

Für den 33.3 V Akku konnte kein Laderegler wie der LTC4008 gefunden werden. Das Problem ist hier die hohe Akkuspannung von maximal 37.8 V. Die einfachste Möglichkeit wäre eine Lösung wie in Abbildung 5.1.

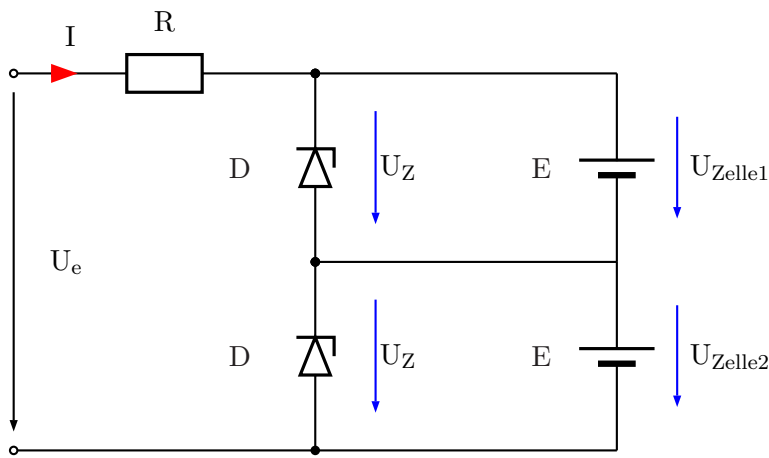


Abbildung 5.1.: Einfache Ladeschaltung für LiPo-Akkus

Die Z-Diode hat eine Zenerspannung in Höhe der maximalen Zellenspannung. Ist die Zellenspannung geringer als die Zenerspannung, fällt beim Anlegen einer Eingangsspannung die Differenz über dem Shuntwiderstand R ab. Der Akku wirkt durch den niedrigen Innenwiderstand fast wie ein Kurzschluß, daher stellt sich ein Strom von

$$I = \frac{U_e - U_{Zelle1} - U_{Zelle2}}{R} \quad (5.7)$$

ein. Erreicht die Zellenspannung die Zenerspannung, fließt ein Teil des Ladestroms durch die Z-Diode und ein Teil durch den Akkumulator, wodurch die Spannung weiter ansteigt. Irgendwann ist die Spannung des Akkus so hoch, dass der gesamte Strom durch die Z-Diode fließt.

LT bietet einen IC an, der ähnlich wie die Schaltung aus Abbildung 5.1 funktioniert. Der LTC4070 liegt parallel zur Zelle. Ein externer MOSFET bietet dabei die Möglichkeit, einen Teil des Ladestroms am Akku vorbeizuführen, er sichert somit die Balance zwischen

5. Energieverteilungskonzept

den Zellen. Prinzipiell können durch den LTC4070 Akkus mit beliebiger Zellenanzahl geladen werden, da sie in Reihe geschaltet werden können. Dieser IC lohnt sich jedoch nur bei kleinen Ladeströmen, da dieser durch den Shuntwiderstand R fließen muss und somit hohe Verluste entstehen. Dies ist auch der Grund, warum dieser Lade-IC nur für den 33.3 V Akku benutzt wird. Hier sind die Ladeströme noch so gering, dass die Verlustleistung in Kauf genommen werden kann.

Berechnungen für den LTC4008 Laderegler

Im Folgenden werden die nötigen Berechnungen für den Laderegler des 7.4 V Akkus dargestellt. Die Rechnungen für die Spannungen 14.8 V und 22.2 V befinden sich im Anhang unter A.2, A.3 und A.4.

Zuerst einige Grenzwerte:

- $U_{\min} = 6 \text{ V}$; $U_{\max} = 8.4 \text{ V}$; $I_{\text{Lade}} = 1\text{C} = 3600 \text{ mA}$; $I_{\text{Servo}} = 5 \text{ A}$
- Voltage Accuracy: $\pm 0.8 \%$
- Charge Current Accuracy: $\pm 4 \%$

Die Überspannung, die durch die Ungenauigkeit des LTC4008 maximal entstehen kann, beträgt 8.46 V. Würde der Laderegler so ausgelegt werden, dass dies nicht auftreten kann, würde einiges an Akkukapazität durch unvollständiges Laden verloren gehen. Die geplanten Balancer werden jedoch gegen eine zu hohe Akkuspannung arbeiten, weshalb der Laderegler für 8.4 V Ladespannung ausgelegt wird.

Zu großen Ladestrom durch Ungenauigkeit des LTC4008 vermeiden:

$$I_{\text{Lade}} = 3.6 \text{ A} \quad \hat{=} 104 \% \quad (5.8)$$

$$I_{\text{Lade}} = 3.46 \text{ A} \quad \hat{=} 100 \% \quad (5.9)$$

R_{Sense} berechnen:

$$R_{\text{Sense}} = \frac{100 \text{ mV}}{I_{\text{Lade}}} = \frac{100 \text{ mV}}{3.46 \text{ A}} = 0.029 \Omega \quad (5.10)$$

$$P_{\text{Sense}} = I_{\text{Lade}}^2 \cdot R_{\text{Sense}} = 3.46^2 \text{ A}^2 \cdot 30 \text{ m}\Omega = 0.36 \text{ W} \quad (5.11)$$

$$R_{\text{Sense}} = 30 \text{ m}\Omega (1 \%, 0.5 \text{ W}) \text{ aus E 24}$$

R_{Prog} berechnen:

$$R_{\text{Prog}} = \frac{U_{\text{Ref}} \cdot 3.01 \text{ k}\Omega}{R_{\text{Sense}} \cdot I_{\text{Lade}} + 0.035 \text{ V}} = \frac{1.19 \text{ V} \cdot 3.01 \text{ k}\Omega}{30 \text{ m}\Omega \cdot 3.46 \text{ A} + 0.035 \text{ V}} = 25.8 \text{ k}\Omega \quad (5.12)$$

$$R_{\text{Prog}} = 26.1 \text{ k}\Omega (1\%) \text{ aus E 24}$$

R_7 und R_8 für $U_{\text{Lade}} = 8.4 \text{ V}$ bestimmen [6, S. 14, Table 3]:

$$R_7 = 158 \text{ k}\Omega (0.25 \%) \text{ aus E 96}$$

$$R_8 = 26.1 \text{ k}\Omega (0.25 \%) \text{ aus E 96}$$

L₁ bestimmen [6, S. 15, Table 4]:

Maximum average current: 4 A

Input Voltage ≤ 20 V $L_1 = 10 \mu\text{H}(\pm 20 \%)$ **R_{CL} berechnen:**

Da die Servos nicht getestet werden, während die Netzteile angeschlossen sind, gilt:

 $I_{\text{Lim}} = 3.46 \text{ A}$

$$R_{\text{CL}} = \frac{100 \text{ mV}}{I_{\text{Lim}}} = \frac{100 \text{ mV}}{3.6 \text{ A}} = 28.9 \text{ m}\Omega \quad (5.13)$$

$$P_{\text{CL}} = I_{\text{Lade}}^2 \cdot R_{\text{CL}} = 3.46^2 \text{ A}^2 \cdot 30 \text{ m}\Omega = 0.36 \text{ W} \quad (5.14)$$

 $R_{\text{CL}} = 30 \text{ m}\Omega(1 \%, 0.5 \text{ W})$ aus E 48**Überhitzungsschutz berechnen:** $T_{\text{Low}} = 0^\circ\text{C}; T_{\text{High}} = 60^\circ\text{C}$

$$R_9 = 6 \cdot R_{\text{NTC Low}} \cdot \frac{R_{\text{NTC High}}}{R_{\text{NTC Low}} - R_{\text{NTC High}}} \quad (5.15)$$

$$R_{36} = 6 \cdot R_{\text{NTC Low}} \cdot \frac{R_{\text{NTC High}}}{R_{\text{NTC Low}} - 7 \cdot R_{\text{NTC High}}} \quad (5.16)$$

Für R_{Th} wurde der BS7164 ausgewählt. Dieser hat für den Temperaturbereich $0^\circ\text{C} \leq T \leq 60^\circ\text{C}$ folgende Widerstände: $R_0 = 35.563 \text{ k}\Omega; R_{25} = 10 \text{ k}\Omega; R_{60} = 2.237 \text{ k}\Omega$

Daraus folgt:

$$R_9 = 6 \cdot 35.563 \text{ k}\Omega \cdot \frac{2.237 \text{ k}\Omega}{35.563 \text{ k}\Omega - 2.237 \text{ k}\Omega} = 13.323 \text{ k}\Omega \quad (5.17)$$

$$R_9 = 6 \cdot 35.563 \text{ k}\Omega \cdot \frac{2.237 \text{ k}\Omega}{35.563 \text{ k}\Omega - 7 \cdot 2.237 \text{ k}\Omega} = 23.981 \text{ k}\Omega \quad (5.18)$$

 $R_9 = 14.3 \text{ k}\Omega(1 \%)$ aus E96 $R_{36} = 23.7 \text{ k}\Omega(1 \%)$ aus E96

$$C_5 = 10 \cdot R_T \cdot 17.5 \text{ pF} \cdot \frac{7}{R_9 \cdot (-\ln(1 - 8 \cdot \frac{15 \text{ mV}}{4.5 \text{ V}}))} = 4.75 \cdot 10^{-7} \text{ F} \quad (5.19)$$

 $C_5 = 0.470 \mu\text{F}$ aus E 48

Für alle anderen Werte wurden die Standardbauelemente aus dem Datenblatt herangezogen. Außerdem konnte die Berechnung für den Überhitzungsschutz für alle Laderegler mit LTC4070 verwendet werden, da der Temperaturbereich für alle Akkus gleich ist.

Power-Path

Normalerweise ist im Datenblatt die Konstellation aus Q_4 , D_5 und R_{14} (siehe Abbildung 5.2) nicht vorgesehen. Nach Beenden des Ladevorgangs und Abschalten des Netzteils,

5. Energieverteilungskonzept

würde der Akku somit die Last versorgen, indem der Strom zu ihr durch R_{SENSE} , L_1 und die Bodydiode von Q_2 fließt. Dies führt zu hohen Verlusten, weshalb der Power-Path eingebaut wurde. Ist der Akku nicht komplett geladen und das Netzteil angeschlossen, sperrt Q_4 . Ist das Netzteil ausgeschaltet, leitet Q_4 und der Akku kann die Last über den verlustärmeren Weg durch Q_4 versorgen. D_6 verhindert eine zu hohe Spannung am Gate.

Berechnungen für den LTC4070 Akkulader

Im Folgenden werden die nötigen Berechnungen zur Beschaltung des LTC4070 durchgeführt. Zunächst die nötigen Grenzwerte:

- $U_{\min} = 27 \text{ V}$; $U_{\max} = 37.8 \text{ V}$
- $I_{\text{Lade}} = 1\text{C} = 1000 \text{ mA}$

Shuntwiderstand berechnen

$$R_{\text{Shunt}} = \frac{U_{\text{Lade}} - U_{\min}}{I_{\text{Lade}}} = \frac{37.8 \text{ V} - 27 \text{ V}}{1 \text{ A}} = 10.8 \Omega \quad (5.20)$$

$$P_{\text{Shunt}} = I_{\text{Lade}}^2 \cdot R_{\text{Shunt}} = 1^2 \text{ A}^2 \cdot 10.8 \Omega = 10.7 \text{ W} \quad (5.21)$$

Ein Widerstand in dieser Leistungsklasse war schwer zu bekommen, deshalb wurden zwei Widerstände parallel geschaltet, um die Leistung zu halbieren:

$$R_{\text{Shunt1}} = R_{\text{Shunt2}} = 24 \Omega (6 \text{ W}) \text{ aus E 24}$$

5.2.3. Über-/Unterspannungsprotektion

Zuerst wurden Überlegungen angestellt, den Über-/Unterspannungsschutz über Operationsverstärkerschaltungen zu realisieren, da kein geeignetes IC gefunden werden konnte, das alle Anforderungen erfüllt. Diese Realisierung wäre jedoch sehr aufwendig und würde viel Platz auf der Platine verbrauchen. Schließlich wurde ein IC von Maxim gefunden, der eigentlich für die Akkuüberwachung in Elektroautos benutzt wird: MAX11080. Dieses IC eignet sich hervorragend für die Verwendung auf dem EAGLE, da es sehr klein ist und zehn Zellen gleichzeitig überwachen kann. Der Alarmausgang wird im Fehlerfall auf 3.3 V gesetzt und liefert maximal $450 \mu\text{A}$.

Für die optische Warnung wurde eine LED im Frontpanel eingeplant, die im Fehlerfall leuchten soll. Mit $450 \mu\text{A}$ lässt sich keine LED betreiben, deshalb wurde eine Stromverstärkung mit einem Darlington-Transistor vorgenommen. Um den Akku im Fehlerfall zu schützen, wird gleichzeitig ein zweiter Darlington-Transistor durchgesteuert, der den Laderegler abschaltet.

Um eine permanente Überwachung zu gewährleisten, ist es nötig, den Über-/Unterspannungsschutz immer im Betrieb zu halten. Dies ist möglich, da der MAX11080 während der Überwachung der Zellen auch aus diesen versorgt wird. Außerdem wird mit einer Reihenschaltung aus Widerstand und Z-Diode die Spannung am SHDN-Pin konstant auf High-Pegel gehalten, damit der MAX11080 immer eingeschaltet ist. Die

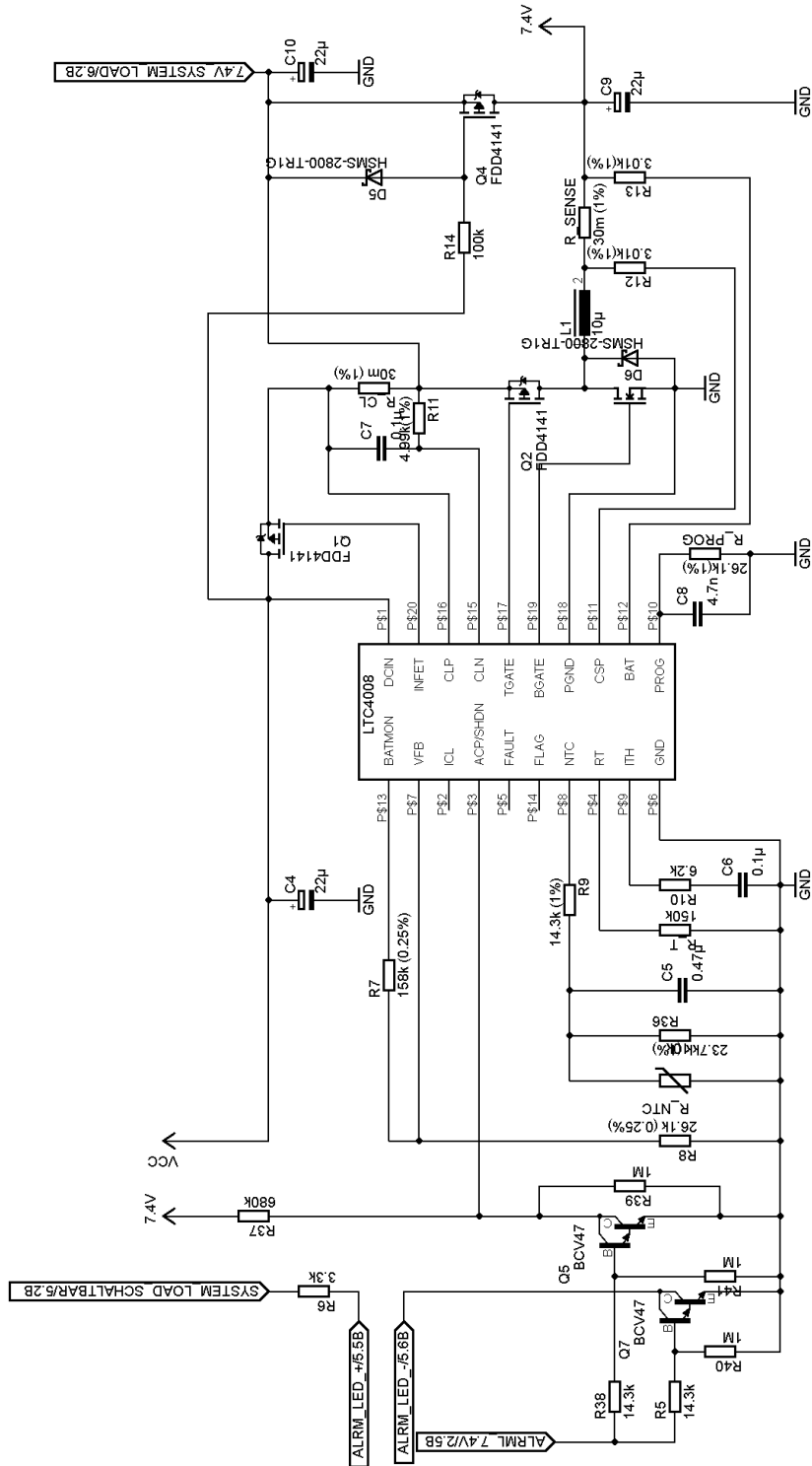


Abbildung 5.2.: Laderegler für den 7.4 V Akku

5. Energieverteilungskonzept

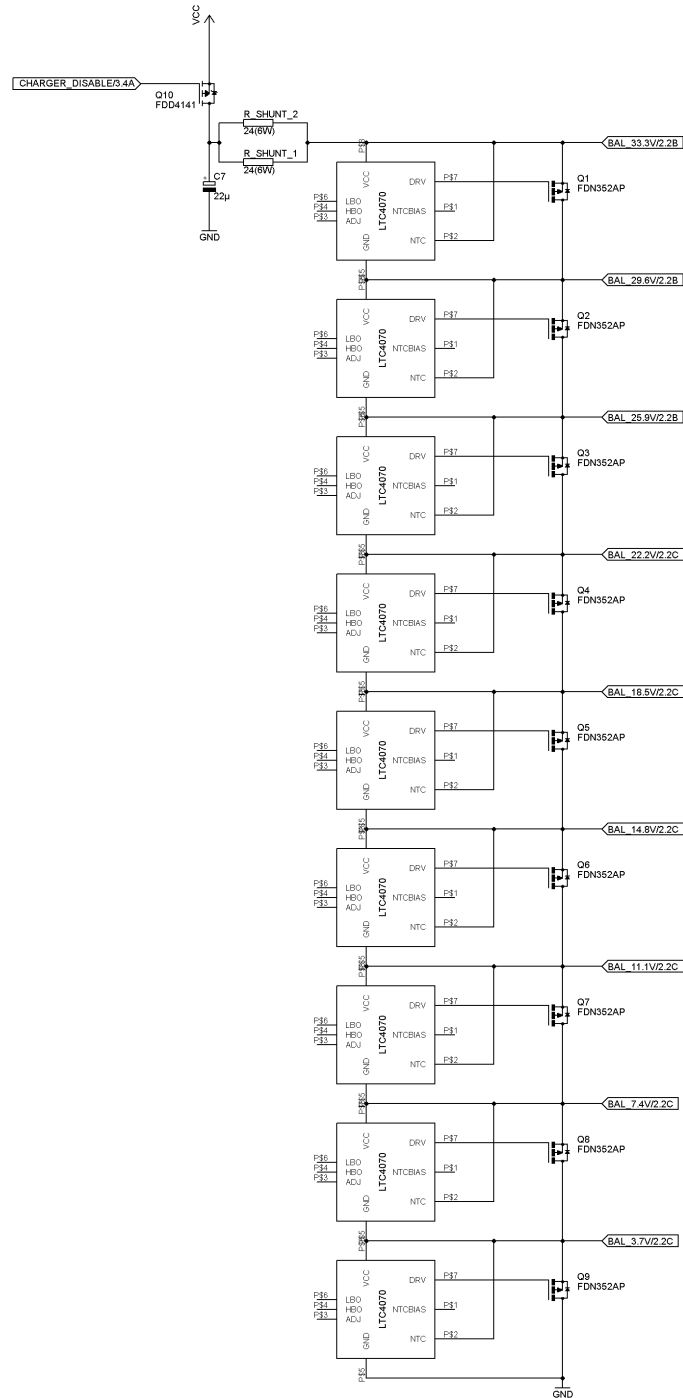


Abbildung 5.3.: Laderegler für den 33.3 V Akku

Belastung des Akkus beträgt dabei maximal $80\,\mu\text{A}$, was wie im Falle des $7.4\,\text{V}$ Akkus mit $3600\,\text{mAh}$ einer Laufzeit von 5 Jahren entspricht.

Die einzige Rechnung, die vorgenommen werden musste, war die Berechnung des Delays während eines Fehlers. Der MAX11080 bietet die Möglichkeit, bei einem Zellenfehler nicht sofort in den Alarmmodus zu springen, sondern erst, wenn eine bestimmte Zeit vergangen ist. Dies ist vor allem nützlich bei kurzen Spitzenströmen, durch die die Zellenspannung sehr kurz zusammenbrechen kann und ein Fehler detektiert werden würde. Ein Delay von $1\,\text{s}$ ist als ausreichend erachtet worden. Nach dem Datenblatt [8] berechnet sich der dafür nötige Kondensator wie folgt:

$$C_{\text{DLY}} = \frac{t_{\text{DLY}} \cdot I_{\text{CD}}}{U_{\text{CD}}} = \frac{1\,\text{s} \cdot 6.1\,\mu\text{A}}{1.23\,\text{V}} = 4.95\,\mu\text{F} \quad (5.22)$$

$C_{\text{DLY}} = 4.7\,\mu\text{F}$ aus E24

Dieser Kapazität ergibt ein Delay von

$$t_{\text{DLY}} = \frac{C_{\text{DLY}} \cdot U_{\text{CD}}}{I_{\text{CD}}} = \frac{4.7\,\mu\text{F} \cdot 1.23\,\text{V}}{6.1\,\mu\text{A}} = 0.94\,\text{s} \quad (5.23)$$

I_{DLY} ist dabei der Strom aus der Konstantstromquelle, die den Kondensator lädt und U_{CD} die Referenzspannung, mit der die Kondensatorspannung über einen Schmitt-Trigger verglichen wird und den ALRML-Pin umschaltet.

Die restliche Beschaltung ist wie im Datenblatt beschrieben vorgenommen worden. Der Schaltplan für die Protektion des $7.4\,\text{V}$ Akkus ist in Abbildung 5.4 zu sehen. Diese Schutzbeschaltung konnte für alle Akkus übernommen werden und schaltet bei einem Fehler den jeweiligen Laderegler ab.

5.2.4. Balancing der Akkumulatoren

Der Laderegler LTC4070 bietet die Möglichkeit, den Akku zu Balancen. Über einen externen MOS-FET wird der Ladestrom an der Zelle vorbeigeleitet. Daher müssen hier keine Maßnahmen getroffen werden.

Der LTC4008 hingegen bietet keine Möglichkeit, den Akku zu balancen, deshalb musste eine andere Variante gefunden werden. Viele Akkuüberwachungs-ICs wie der BQ77910A von TI bieten diese Möglichkeit. Bei allen überprüften ICs war diese Funktion jedoch nur in Verbindung mit einem Mikrocontroller möglich, auf die verzichtet werden sollte.

Die nächste Idee war, den Balancer selber zu konzipieren. Vom Prinzip her musste ein IC gefunden werden, welches die Zellenspannung überwacht und bei Überschreitung einen Transistor oder MOS-FET durchschaltet. Eine Hysterese sollte mit eingebaut werden, damit es um die Schaltschwelle herum nicht zum Schwingen kommt. Nach einigen Recherchen fiel der Blick auf den LTC1540 von LT. Dieser Komparator mit extern einstellbarer Hysterese hat intern eine eigene Referenzspannungsquelle und einen stand-by-Strom von $300\,\text{nA}$. Der niedrige stand-by-Strom sorgt für eine lange Lagerzeit, da der Balancer im Normalfall nicht vom Akku getrennt wird und durch die interne Referenzspannungsquelle können Bauteile eingespart werden, die sonst

5. Energieverteilungskonzept

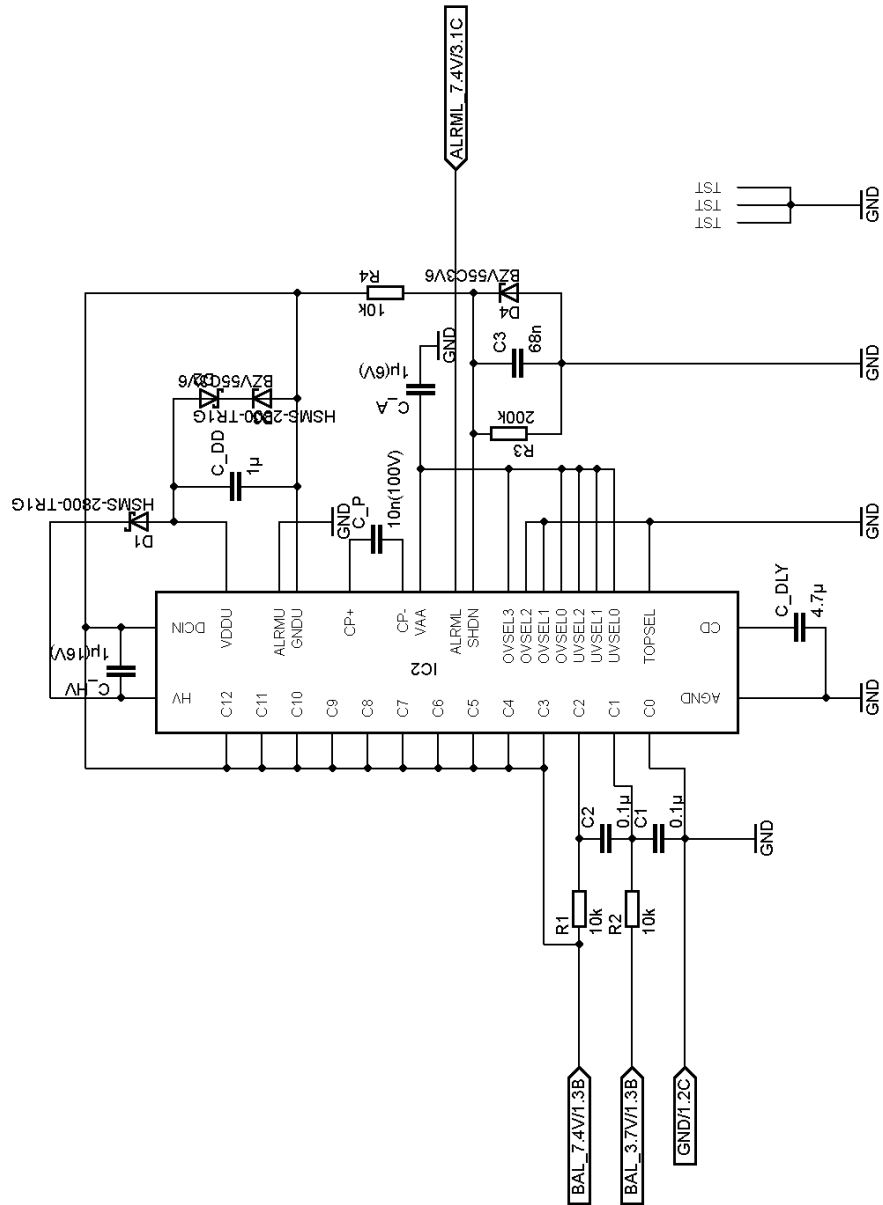


Abbildung 5.4.: Über-/Unterspannungsprotektion für den 7.4 V Akku

benötigt worden wären. Der Schaltplan für den fertigen Zellenbalancer ist unter Abbildung 5.5 zu sehen. Ein Vorteil dieser Schaltung ist, dass sie sich selber über die Zelle versorgt und vom Anwender keine weitere Beachtung geschenkt werden muss.

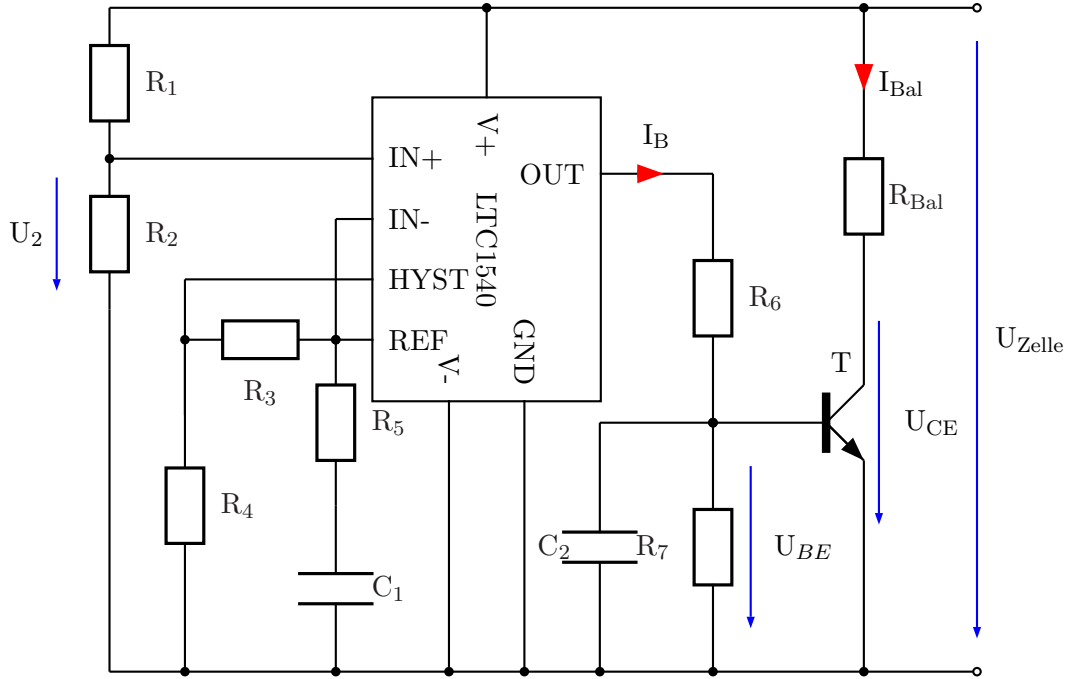


Abbildung 5.5.: Balancer für eine Zelle

Berechnungen für den Zellenbalancer

Der Widerstand und der Kondensator zur Stabilisierung der Referenzspannungsquelle an REF sind aus dem Datenblatt vorgegeben mit $R_5=3\text{ k}\Omega$ und $C_1=10\text{ nF}$. Die Zellenspannung $U_{\text{Zelle}}=3\text{ V} \dots 4.2\text{ V}$, der Kondensator C_2 soll ein unerwünschtes Schwingen am Ausgang unterdrücken und wird mit 100 nF angesetzt.

Sobald die Zellenspannung über 4.2 V liegt, soll der Balancer seine Arbeit aufnehmen, d. h. der Transistor T soll durchgeschaltet werden, um den Ladestrom an der Zelle vorbeizuleiten. Daher gilt:

$$U_2 = U_{\text{Akku}} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} > U_{\text{REF}} = 1.182\text{ V} \quad (5.24)$$

R_1 und R_2 berechnen:

Da der LTC1540 spannungsgesteuert ist, können R_1 und R_2 sehr hochohmig sein. Daher wurde $R_2=2\text{ M}\Omega$ (1%) aus E24 gewählt, über die umgestellte Gleichung 5.24 mit

$$R_1 = \frac{4.2\text{ V}}{1.182\text{ V}} \cdot 2\text{ M}\Omega - 2\text{ M}\Omega = 5.106\text{ M}\Omega \quad (5.25)$$

5. Energieverteilungskonzept

berechnet und mit $R_1=5.1\text{ M}\Omega$ (1%) aus E24 gewählt.

Hysteresis berechnen:

Für die Hysteresis wurden Werte von $U_{\text{HYST}}=50\text{ mV}$ und $I_{\text{REF}}=1\text{ }\mu\text{A}$ gewählt und nach Datenblatt mit

$$\text{RATIO} = \frac{U_{\text{REF}}}{U_{\text{Akku}}} = \frac{1.182\text{ V}}{4.2\text{ V}} = 0.281 \quad (5.26)$$

$$U_{\text{HB}} = U_{\text{HYST}} \cdot \text{RATIO} = 50\text{ mV} \cdot 0.281 = 14.05\text{ mV} \quad (5.27)$$

$$R_3 = \frac{U_{\text{HB}}}{2 \cdot I_{\text{REF}}} = \frac{14.05\text{ V}}{2 \cdot 1\text{ }\mu\text{A}} = 7025\text{ }\Omega \quad (5.28)$$

$$R_4 = \frac{U_{\text{REF}} - \frac{U_{\text{HB}}}{2}}{I_{\text{REF}}} = \frac{1.182\text{ V} - \frac{14.05\text{ mV}}{2}}{1\text{ }\mu\text{A}} = 1.175\text{ M}\Omega \quad (5.29)$$

berechnet [4]. Gewählt wurde dann für $R_3=7.15\text{ k}\Omega$ (1%) aus E48 und $R_4=1.18\text{ k}\Omega$ (1%) aus E96.

R_{Bal} berechnen:

Der Balancer soll in der Lage sein, einen Ladestrom von $I_{\text{Bal max}}=500\text{ mA}$ an der Zelle vorbeizuführen. $U_{\text{CE satt}}$ wurde mit 0.2 V angenommen.

$$R_{\text{Bal}} = \frac{U_{\text{Zelle}} - U_{\text{CE satt}}}{I_{\text{Bal max}}} = \frac{4.2\text{ V} - 0.2\text{ V}}{500\text{ mA}} = 8\text{ }\Omega \quad (5.30)$$

$$P_V = 0.5^2\text{ A}^2 \cdot 8\text{ }\Omega = 2\text{ W} \quad (5.31)$$

Die Verlustleistung P_V ist mit 2 W sehr hoch. In dieser Leistungsklasse wurde nur ein Widerstand von $10\text{ }\Omega$ gefunden, wodurch $I_{\text{Bal max}}$ auf 420 mA sinkt. Dieser tritt jedoch nur bei sehr großen Zellendriffs auf, daher ist ein Wert von 420 mA zulässig.

R_6 berechnen:

Um den Transistor durchzuschalten ist ein $I_B=10\text{ mA}$ und ein U_{BE} von 0.6 V nötig.

$$R_6 = \frac{U_{\text{OUT}} - U_{\text{BE}}}{I_{\text{OUT}}} = \frac{4.2\text{ V} - 0.6\text{ V}}{10\text{ mA}} = 360\text{ }\Omega \quad (5.32)$$

Gewählt wurde dann $R_6=360\text{ }\Omega$ aus E24. R_7 sollte etwa $1/10$ des Basisstroms führen und wurde daher auf

$$R_7 = \frac{0.6\text{ V}}{1\text{ mA}} = 600\text{ }\Omega \quad (5.33)$$

gesetzt. Dieser Balancer kann mit der in Abbildung 5.5 gezeigten Beschaltung und den errechneten Werten problemlos für alle Akkuzellen benutzt werden.

5.2.5. Ladezustandsanzeige

Auch bei der Ladezustandsanzeige sollte auf Mikrocontroller verzichtet werden. Damit hätte der Entladestrom gemessen und über die Zeit integriert werden können, um zu

ermitteln, wie viel der Akku noch geladen ist. Somit ist die Ermittlung des Ladezustands nur über die Spannung möglich.

Durch den Verzicht von Mikrocontrollern ist eine präzise Bestimmung des Ladezustands nicht möglich. Daher wurde vorgeschlagen, eine „Ladezustands-Ampel“ zu entwickeln. Über diese soll auf einen Blick eine grobe Übersicht über den Ladezustand eines Akkus möglich sein. Dazu werden drei LEDs (rot, gelb und grün) so beschalten, dass sie bei bestimmten Akkuspannungen leuchten. Bei vollem Akku sollen alle drei LEDs leuchten, bei halbvollen Akku nur noch gelb und rot und bei fast leerem Akku ausschließlich rot.

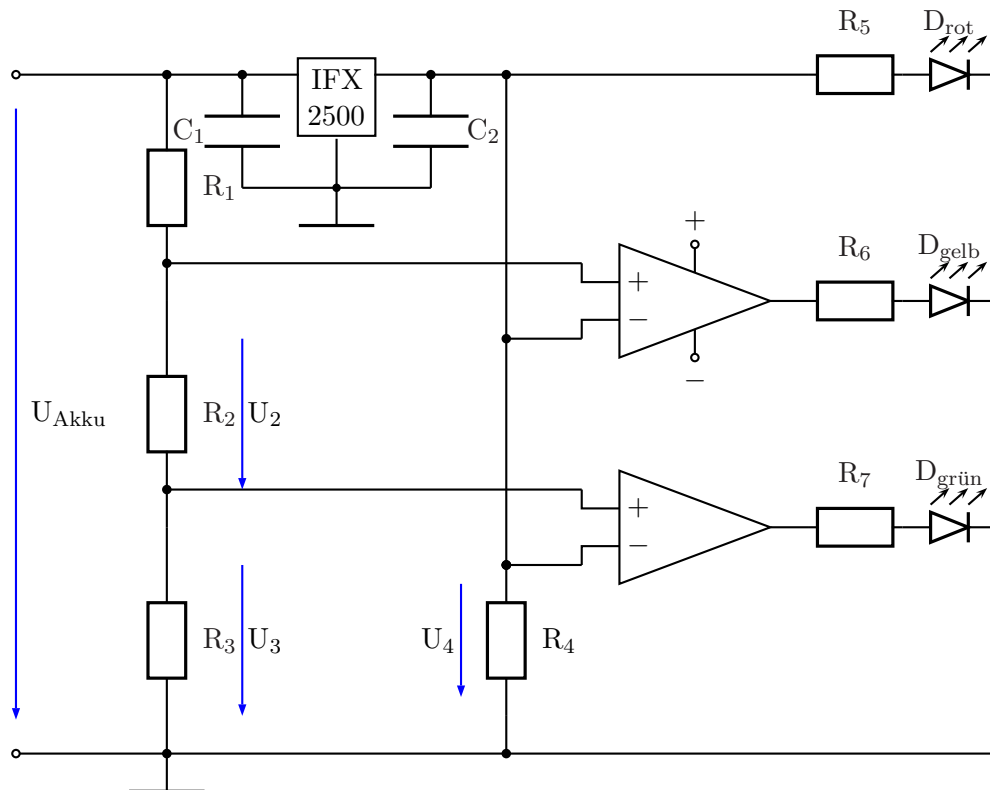


Abbildung 5.6.: Ladezustandsanzeige über die Akkuspannung

Für dieses Konzept konnte die Schaltung in Abbildung 5.6 mit zwei Komparatoren, die in einem Gehäuse sind, entwickelt werden. Die Komparatoren haben einen Verbrauch von 300 nA, jedoch einen Eingangsspannungsbereich von nur 5 V. Deshalb wurde ein 5 V-Spannungsregler zum Versorgen der Komparatoren und als Referenzspannungsquelle eingesetzt. Dies hat den Vorteil, dass die Schaltung problemlos für Spannungen bis hoch zur Grenze des Spannungsreglers angepasst werden kann.

$C_1=1\mu\text{F}$ wurde gewählt, um kurze Spannungseinbrüche am Eingang des IFX2500 abzufangen, $C_2=100\text{nF}$ beseitigt die letzten Störungen hinter dem Spannungsregler. Durch die LEDs $D_{\text{grün}}$, D_{gelb} und D_{rot} muss für volle Leuchtkraft 5 mA fließen. Daher

5. Energieverteilungskonzept

berechnen sich für $U=5\text{ V}$ und $U_v=2\text{ V}$ die Vorwiderstände R_5 , R_6 und R_7 mit

$$R = \frac{U - U_v}{I} = \frac{5\text{ V} - 2\text{ V}}{5\text{ mA}} = 1\text{ k}\Omega \quad (5.34)$$

R_4 soll für ein definiertes Potential sorgen und wurde deshalb auf $1\text{ M}\Omega$ gesetzt.

Die Widerstände R_1 , R_2 und R_3 sorgen für das Umschalten der Komperatoren. Sie müssen für jeden Akku angepasst werden, da sich die Akkuspannungen und auch die Entladekurven unterscheiden. Aus diesem Grund wurden für jeden Akku die Entladekennlinien aufgenommen. Dabei fiel auf, dass das bis dahin genutzte Ladegerät der Firma Graupner die Akkus nicht vollständig auflädt. Zum Beispiel kann man in Abbildung 5.7 erkennen, dass die Spannung am Anfang der Messung, somit im vom Ladegerät als voll geladenen Zustand deklariert, 8.2 V beträgt. Wäre der Akku komplett geladen, würde die Spannung 8.4 V betragen. Dies schlägt sich auch erheblich auf die Kapazität nieder. Diese kann aus der Entladekennlinie berechnet werden, indem die Zeit vom Beginn des Entladens bis zum Erreichen der Entladeschlussspannung, hier 6 V , mit dem Entladestrom multipliziert wird. Demnach ergibt sich ein Kapazität für die Entladekennlinie $I=3.6\text{ A}$ von

$$Q = I \cdot t = \frac{3600\text{ mA} \cdot 3101.09\text{ s}}{3600} = 3101.09\text{ mAh} \quad (5.35)$$

Das entspricht einen Kapazitätsverlust von 13.9% . Außerdem lädt das Ladegerät den Akku nicht immer gleich, weshalb Unterschiede zwischen den einzelnen Entladekennlinien eines Akkus zu erkennen sind.

Interessant ist auch zu sehen, wie sich die Entladekennlinien von Hersteller zu Hersteller unterscheiden. Während die Kennlinie des Akkus von SLS in Abbildung A.1 im ersten Viertel eine „Beule“ aufweist, besitzen sämtliche Akkus der Firma Kokam einen Knick im letzten drittel (Abbildung 5.7 und Abbildung A.12). Der Akku von Conrad Energy legt in der ersten Hälfte bei kleineren Belastungen ein merkwürdigeres Verhalten an den Tag, die Spannung sackt abrupt ab und konnte nach mehrmaligem Messen beobachtet werden.

R_1 , R_2 und R_3 für 7.4 V Akku berechnen:

In Abbildung 5.7 ist die Entladekennlinie des Kokam $7.4\text{ V}/3600\text{ mAh}$ Akkus zu sehen. Außerdem wurden zwei Spannungen ausgewählt, an denen die Ladezustandsanzeige umschalten soll. Bei 7.5 V ist der Ladezustand nach der Kennlinie bei 3600 mA noch bei etwa 60% , bei 7.2 V bei 25% . Nach diesen Punkten werden im Folgenden die benötigten Widerstände berechnet. Zur Lösung der Gleichungen wird ein Widerstand benötigt, deshalb wird $R_3 = 1\text{ M}\Omega(1\%)$ bestimmt. Die Referenzspannung beträgt 5 V , deshalb muss bei den ausgewählten Akkuspannungen 5 V unterschritten werden. So ergeben sich

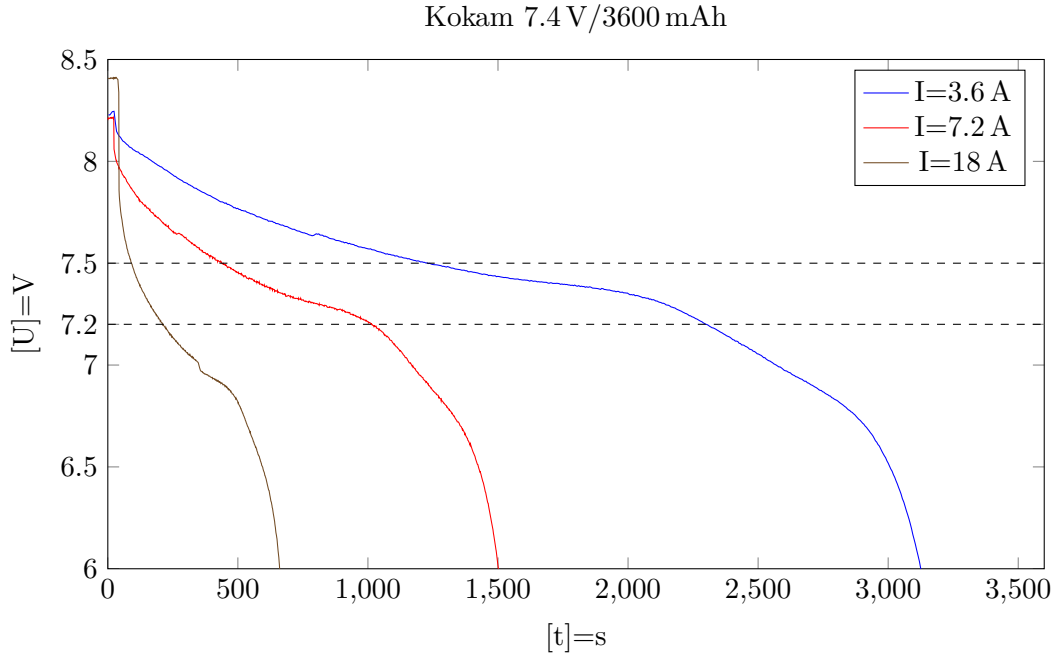


Abbildung 5.7.: Entladekennlinien des Kokam 7.4 V/3600 mAh

folgende Gleichungen:

$$U_{23} = U_2 + U_3 \quad (5.36)$$

$$U_3 = U_{\text{Akku}} \cdot \frac{R_3}{R_1 + R_2 + R_3} \Rightarrow R_1 + R_2 = \frac{U_{\text{Akku}}}{U_3} \cdot R_3 - R_3 \quad (5.37)$$

$$U_{23} = U_{\text{Akku}} \cdot \frac{R_2 + R_3}{R_1 + R_2 + R_3} \quad (5.38)$$

Ineinander eingesetzt ergibt sich:

$$U_{23} = U_{\text{Akku}} \cdot \frac{R_2 + R_3}{\frac{U_{\text{Akku}}}{U_3} \cdot R_3 - R_3 + R_3} \quad (5.39)$$

Da R_3 , U_{23} und U_{Akku} bekannt sind, können die fehlenden Widerstände berechnet werden:

$$R_2 = \frac{5 \text{ V}}{7.2 \text{ V}} \cdot \left(\frac{7.5 \text{ V}}{5 \text{ V}} \cdot 1 \text{ M}\Omega - 1 \text{ M}\Omega + 1 \text{ M}\Omega \right) - 1 \text{ M}\Omega = 41.57 \text{ k}\Omega \quad (5.40)$$

$$R_1 = \frac{7.5 \text{ V}}{5 \text{ V}} \cdot 1 \text{ M}\Omega - 42.2 \text{ k}\Omega - 1 \text{ M}\Omega = 457.8 \text{ k}\Omega \quad (5.41)$$

$R_1 = 464 \text{ k}\Omega(1 \%)$ aus E48

$R_2 = 42.2 \text{ k}\Omega(1 \%)$ aus E48

$R_3 = 1 \text{ M}\Omega(1 \%)$ aus E48

5. Energieverteilungskonzept

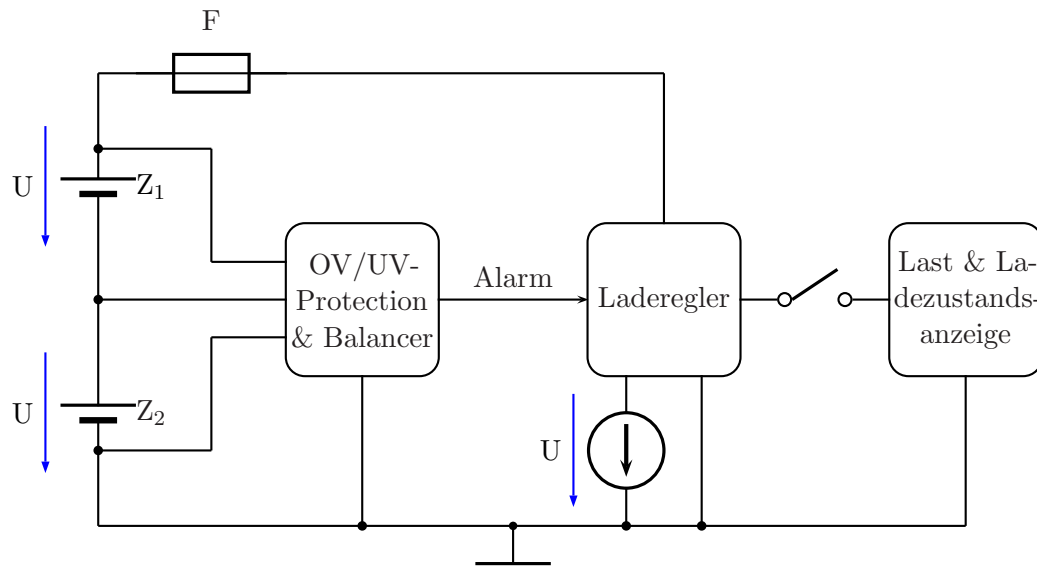


Abbildung 5.8.: Schematische Darstellung der 7.4 V-Akku Subsystemzusammenschaltung

5.2.6. Zusammenschalten der Komponenten

Das Zusammenführen der einzelnen Subsysteme geschieht nach Abbildung 5.8. Die Über-/Unterspannungsprotektion, die Balancer sowie der Laderegler befinden sich andauernd am Akku. Die beiden erstgenannten verbrauchen im Stand-by einen Strom im nA-Bereich, der Laderegler im zweistelligen μA -Bereich, weshalb eine schnelle Entladung durch diese Schaltungen ausgeschlossen werden kann. Last und Ladezustandsanzeige können über Schalter am Frontpanel abgeschaltete werden.

5.3. Layout und Position der Platinen

Da nur sehr wenig Platz zur Verfügung steht, muss eine geeignete Position für die Platine gefunden werden, die jedoch auch möglichst nah an den Akkus liegt. Werden die Schaltungen auf einer Platine zusammengefasst, könnte von einem einzigen Punkt aus die Versorgung stattfinden. Probleme würde es jedoch geben, wenn eine Schaltung durch einen Defekt ausfallen würde. Die komplette Platine müsste getauscht werden, was zu hohen Kosten und einem schwierigeren Umbau führen würde. Daher wurde beschlossen, für jeden Akku eine Platine mit dem jeweiligen Laderegler und Schutzbeschaltungen zu fertigen. Diese Platinen können viel flexibler positioniert werden und im Falle eines Defektes leicht und kostengünstig ausgetauscht werden. Außerdem bietet es sich an, die Platinen über den Akkus zu befestigen. Somit wäre die Nähe zu den Akkus gewährleistet und nur wenig zusätzlicher Platz auf der Plattform benötigt. Die Maße der Akkus betragen $130\text{ mm} \times 40\text{ mm}$ und variieren nur in ihrer Höhe. Daher wird als maximale Platinengröße

5.3. Layout und Position der Platinen

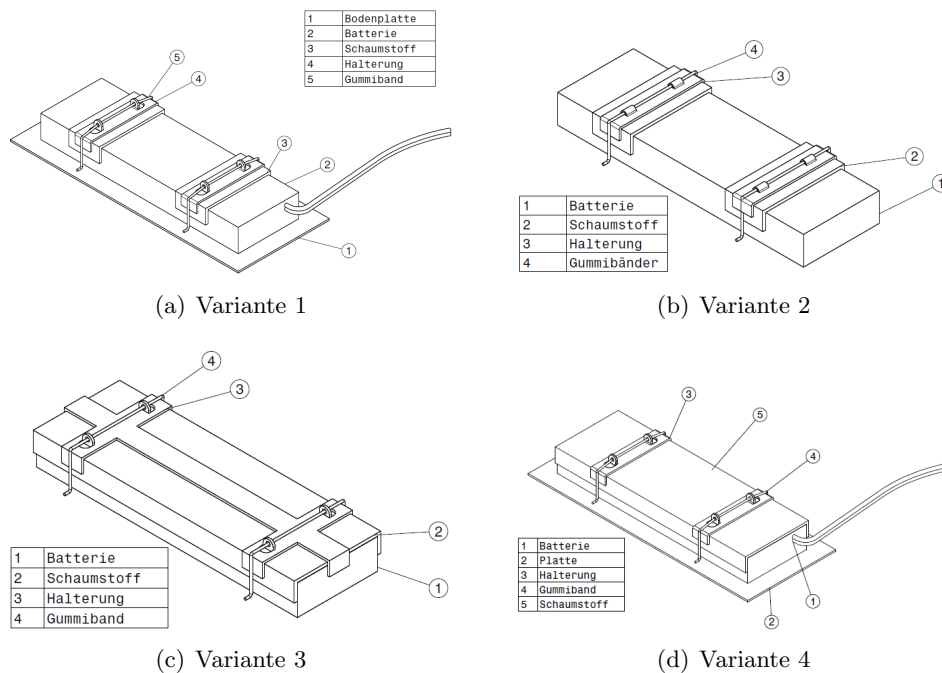


Abbildung 5.9.: Vier Vorschläge für eine Akkuhalterung

135 mm × 62.5 mm festgelegt. Bei dieser Größe ist es möglich, Abstandshalter in die Ecken der Platine zu schrauben und sie am darunter liegenden Akku vorbeizuführen. Auf der Plattform können einfache Löcher gebohrt werden und von der anderen Seite eine Schraube durchgesteckt werden, um die Abstandshalter an der Plattform zu befestigen.

Die Halterung für die Akkus muss drei wichtige Anforderungen erfüllen:

- geringes Gewicht
- Akku fest in Position halten
- Ausdehnung eines defekten Akkus zulassen

Würde sich ein Akku in einem starren Gestell ausdehnen, könnte die Hülle eingedrückt oder zerrissen werden, wodurch Brandgefahr besteht. Die ersten Überlegungen war eine Konstruktion aus Federn und Metall, wie sie bereits auf den TEAMS-Fahrzeugen des DLR benutzt wird, die aber schnell durch das hohe Gewicht verworfen wurden. Die nächsten Ideen waren Konstruktionen aus Schaumstoff, Gummibändern und Klettband. Durch den Schaumstoff ist es möglich, dass sich der Akku ausdehnt, die Gummibänder und das Klettband halten den Akku in Position. Einzig die Arretierung der Gummibänder auf dem Akkumulator besteht aus einem Metall, um gleichmäßigen Druck auf den Akku auszuüben. In den Abbildungen 5.9 sind vier mögliche Varianten dargestellt. Um zu testen, wie geeignet diese Art der Befestigung ist, wurde sich für Variante 1 entschieden. Diese hat den Vorteil, dass sie sehr einfach zu fertigen ist. Variante 3 und 4 können

5. Energieverteilungskonzept

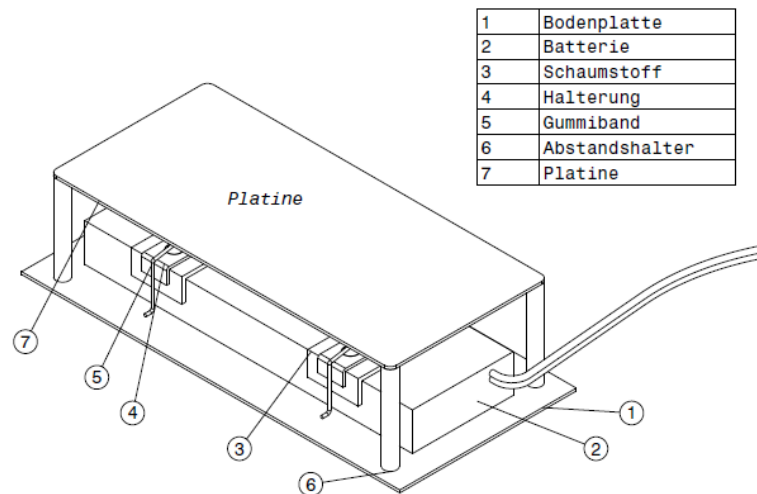


Abbildung 5.10.: Akkuhalterung mit aufgesetzter Platine

in dieser Form nicht zum Einsatz kommen, da der Schaumstoff den kompletten Akku bedecken. Da die Akkus für maximal 60°C spezifiziert sind und sie sich bei Belastung auf $40\text{-}50^{\circ}\text{C}$ erwärmen können, könnte es so zu thermischen Problemen kommen. In Abbildung 5.10 ist zu sehen, wie die Platinen über den Akkus angebracht werden. Der Abstand zum Akku sollte nicht zu knapp sein, da sich auch hier ein Hitzestau entwickeln könnte. Außerdem wurden die Layouts so konzipiert, dass die Balancer und Laderegler oben auf der Platine liegen, damit die Wärme nach oben entweichen kann.

Beim Design der Platine wurde darauf geachtet, dass die Bauteile der einzelnen Schaltungssegmente nah aneinander liegen. Die Segmente selber wurden über die Platine verteilt, um Störungen untereinander zu vermeiden. Gerade der Laderegler ist eine potentielle Störquelle, da hier mit Frequenzen von mehreren kHz gearbeitet wird. Außerdem fließen dort große Ströme, die unter Umständen die Über-/Unterspannungsprotektion stören können und zum Abschalten während des Ladens führen könnte. Um Störungen zu verringern wurden die Schaltungen deshalb von großen Masseflächen umflossen. Außerdem wurden die Leiterbahnen des Ladereglers sehr breit und sehr kurz gehalten, um parasitäre Induktivitäten zu verringern. Die Anschlüsse der Massen des Netzteils, des Akkus und der Last wurden an einem Punkt zusammengeführt, damit die dazwischen fließenden Ströme die anderen Schaltgruppen nicht stört. In den Abbildungen A.2 und A.3 sind Top- und Bottom-Layer der 7.4 V Platine zu sehen.

5.4. Anschluss an die Bodenstation

Die Bodenstation besteht aus einem rollbaren Rack, in dem sämtliche Geräte eingesetzt sind. Dieses Rack wiegt sehr viel und ist daher im Gelände unvorteilhaft. In Tabelle 4.1 unter Nr. 3 ist daher eine Mindestentfernung der Bodenstation vom EAGLE von 30 m

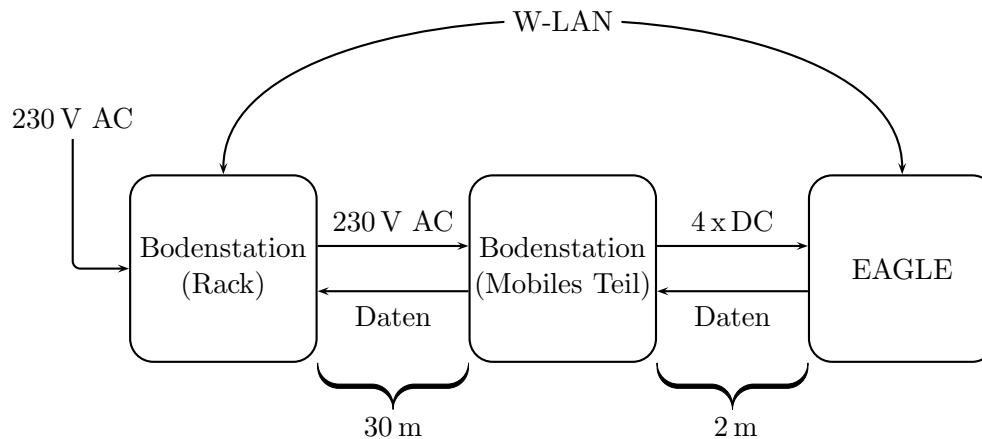


Abbildung 5.11.: Konzept zur Verbindung mit der Bodenstation

gefordert.

Die Akkumulatoren müssen mit einem Gleichstrom auf vier verschiedenen Spannungsebenen geladen werden. Somit fällt eine Versorgung mit 230 V AC weg, da sich an Bord des EAGLE zusätzlich ein Transformator, Gleichrichter samt Glättung, Schaltregler o. ä. befinden müssten. Dies würde das Maximalgewicht der Komponenten von 1574 g deutlich überschreiten und eine aufwendigere Technik voraussetzen.

Die Versorgung mit Gleichspannung würde sich anbieten, da hier bereits zwei Netzteile mit jeweils zwei Ausgängen zur Verfügung stehen. Durch die sehr große Entfernung spielt jedoch die Kabellänge eine entscheidende Rolle. Der Querschnitt der Leitung müsste bei 30 m bereits unhandlich groß werden, um die Spannung am EAGLE zu halten.

Eine Lösung wäre eine Kombination aus den zwei oben genannten Vorschlägen: Die zwei Gleichspannungsnetzteile werden in eine Halterung eingebaut, die mit Tragegriffen ausgestattet ist. Sie werden weiterhin mit 230 V AC versorgt, können aber frei im Gelände bewegt werden. Eine Leitung, die wesentlich kürzer ist, kann an den EAGLE angeschlossen werden und versorgt ihn mit Gleichspannung aus den Netzteilen. In Abbildung 5.11 ist diese Anordnung schematisch dargestellt. Mit den gegebenen Anforderungen ist sie die einzig sinnvoll realisierbare Lösung.

5.5. Grounding-Konzept

Oberste Priorität beim Grounding-Konzept hat der Personenschutz. Dieser muss in allen Fällen gewährleistet sein. Als nächstes folgt der Geräteschutz. Bei Experimenten anderer Projekte sind aufgrund fehlender Präventivmaßnahmen Geräte zu Schaden gekommen. Dadurch kann es zu Datenverlust oder auch zum Scheitern des Experiments kommen.

Der Personenschutz wird durch die Verbindung des Erdleiters mit allen 230 V-Geräten gewährleistet. Dies betrifft die gesamte Bodenstation, d. h. Rack und mobiles Teil. Da

5. Energieverteilungskonzept

der EAGLE mit Kleinspannung ($U \leq 120\text{ V}$) betrieben wird, geht von dort keine Gefahr für Personen aus. Für die Peripherie gibt es jedoch mehrere Gefahren:

1. Brandgefahr durch Akkukurzschluss
2. Brandgefahr durch Funkenbildung (Entzündung des Kerosins)
3. Bauteil- bzw. Gerätedefekt durch elektrostatische Aufladung

Akkukurzschlüsse werden durch Schmelzsicherungen nah an den Akkumulatoren verhindert. Die Sicherungen sind so ausgewählt, dass sie bei Strömen, die höher als der typische Verbraucherstrom sind, auslösen. Einzig bei den Turbinenakkus wurde dies anders gehandhabt. Wie in Abbildung 5.12 zu sehen, löst eine Sicherung, die einen Strom von 100 A dauerhaft fließen lassen kann, bei 250 A nach 1 s aus. In dieser Zeit wird der Akku schon Schäden davon getragen haben, genauso wie die Leitungen durch thermische Vorgänge. Da beim Anlauf jedoch nur kurzzeitig solch hohe Ströme fließen, wurde sich für eine Schmelzsicherung entschieden, die 40 A dauerhaft fließen lassen kann. Die Auslösekennlinie besagt, dass sie bereits bei etwa 160 A nach 1 s auslöst. Zur einfacheren Montage der Sicherungen werden in-line-Sicherungshalter benutzt. Dazu wird die Leitung an einer Stelle aufgetrennt und der Sicherungshalter, der oval geformt ist, eingefügt. Dies bedeutet eine erhebliche Platz- und Gewichtsersparnis.

Ein Gerätedefekt durch elektrostatische Aufladung ist typisch für fliegende Experimente. Der EAGLE stellt im Flug eine Kapazität gegen Erde dar und durch die Reibung der Luft sammeln sich Ladungsträger an dessen Oberfläche. Da die Ladefüße aus einem Kunststoff sind, der den EAGLE gegen Erde isoliert, gleicht sich das Potential des EAGLE nicht bzw. extrem langsam dem Erdpotential an. Nach einem Flug steht somit ein geladener Kondensator mit einer sehr geringen Kapazität am Boden, an dem aber durchaus eine Spannung von mehreren kV anliegen kann. Würde jetzt eine gut leitende Verbindung, z. B. eine Datenleitung angeschlossen werden, würde ein hoher Ausgleichsstrom im $\mu\text{s-ps}$ Bereich fließen, der zu Schäden an Geräten führen kann. Ziel des Grounding-Konzepts muss es somit sein, die Möglichkeiten der Aufladung zu minimieren und eine schnelle Entladung zu vermeiden.

Die Aufladung des EAGLEs im Flugbetrieb ist nicht zu vermeiden, im Bodenbetrieb durch eine permanente Verbindung zum Erdpotential jedoch schon. Deshalb ist eine Erdungsklemme vorgesehen, die an Masse EAGLEs angeklemmt wird, um für eine dauerhafte Verbindung zur Erde zu sorgen. Um undefinierte Widerstände zu vermeiden, ist im Anschlusspanel eine kleine Schiene für die Erdungsklemme vorgesehen. Die Racks der Bodenstationen sowie die Elektronikplattform des EAGLEs werden ebenfalls mit Masse verbunden. Im stationären Betrieb ist der EAGLE so mit Erdpotential verbunden und elektrostatische Aufladung kann von der Struktur des EAGLEs sicher abgeleitet werden, ohne Funken zu bilden.

Nach einem Flug müssen die Ladungsträger sicher und langsam abgeleitet werden. Allein durch das Aufsetzen geschieht das nicht, die Kunststofffüße wirken als zu großer Isolator, die Entladung würde Stunden dauern. Deshalb wird die Schiene, an der die

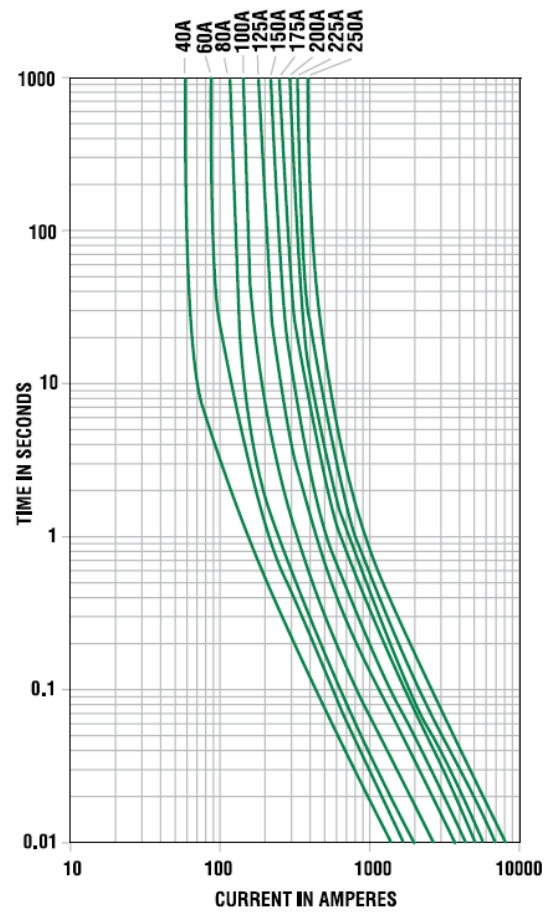


Abbildung 5.12.: Auslösecharakteristiken einiger ausgewählten Sicherungen [7]

5. *Energieverteilungskonzept*

Erdungsklemme angesetzt wird, mit einem Widerstand versehen. Erst hinter dem Widerstand wird die Masse des EAGLEs angeschlossen. Dieser Widerstand hat typischerweise einen Wert von $1\text{ M}\Omega$ [1]. Durch den hohen Widerstand werden große Ströme vermieden und die Ladung in ausreichender Zeit abgeleitet. Zudem werden Funkenbildungen vermieden. Um die Sicherheit zu gewährleisten, muss jedoch folgende Prozedur nach der Landung eingehalten werden:

1. Bodenstation (Daten) mit 2. Bodenstation (Energie) verbinden
2. Erdklemme am vorgesehenen Punkt des EAGLE anklemmen (Berührung leitender Teile vermeiden)
3. Energie- und/oder Datenleitung am EAGLE anschließen

Erst nach Punkt 2 ist nach wenigen Sekunden ein gefahrloses Berühren leitender Teile möglich, je nach Größe der Kapazität und Höhe der statischen Aufladung des EAGLEs gegen Erde.

6. Mechanisches Konzept

6.1. Auswahl der Steckverbinder

Das erste Konzept sah einen einzigen Steckverbinder für alle Leitungen vor. Diese Idee wurde jedoch wieder verworfen, da der Stecker sehr groß und sehr schwer wäre. Außerdem würde es auf den Datenleitungen wahrscheinlich zu Störungen kommen, hervorgerufen durch die Energieübertragung. Das aktuelle Konzept sieht insgesamt drei Steckverbinder vor:

1. 8 Energieleitungen + Erdanschluss
2. 10 Datenleitungen + Schirmanschluss
3. 10-poliger Displayport

Der Displayport bietet die Möglichkeit, über einen kleinen LCD Display mit Dreh- und Druckknopf Informationen des EAGLE-Boards abzurufen, bspw. die Daten der Temperatursensoren oder des Magnetkompass. Bei den Datenleitungen handelt es sich um Ethernet (8-polig) und RS422 (2-polig). Da keine hohen Übertragungsraten gefordert werden, kann hier auf einen Spezialstecker verzichtet werden.

Die wichtigsten Lieferanten für Stecker waren die Firmen Amphenol, Lemo und Souriau. Es wurden zwar noch bei weiteren Firmen wie bspw. Phoenix Contact und Conec nach Steckverbindern gefragt, deren Lösungen waren jedoch nur unzureichend. Das Problem war meist das Gewicht und die Steck- bzw. Zugkraft der Verbinder.

Für den Anschluss der Netzteile zum Laden der Akkus wurden drei Steckverbinder ausgewählt und in Tabelle 6.1 verglichen.

Der Steckverbinder von Souriau schied aus. Im Dialog mit dem Distributor wurde angegeben, der Steckverbinder hätte eine Steck- und Zugkraft unter 50 N, im Datenblatt des Herstellers wird jedoch 111 N angegeben. Aufgrund dieser Unstimmigkeit, dem hohen Preis und der Tatsache, dass kein geeignetes Werkzeug im Haus vorhanden war, wurde von diesem Steckverbinder abgesehen.

Im Vergleich schneidet der Stecker von Lemo besser ab als der von Amphenol. Die Steck- und Zugkraft ist fast 0 N, da der Stecker zum Verbinden angeschraubt wird, was nur ein Drehmoment erzeugt. Außerdem weisen der Kontaktwiderstand und die Lebensdauer wesentlich bessere Werte auf. Dies liegt vor allem daran, dass der Lemo-Stecker extra für den Einsatz auf fliegenden Fahrzeugen konzipiert wurde, für die schärfere Grenzwerte gelten. Der Amphenol-Stecker hingegen ist für Solaranwendungen entwickelt worden.

Trotz der besseren Werte des Lemo-Steckers wurde sich für den Verbinder von Amphenol entschieden, hauptsächlich wegen des maximal anschließbaren Querschnitts. Lemo bietet

6. Mechanisches Konzept

	Souriau	Amphenol	Lemo
Gerätedose	8D5-17M08PN	C016 10G008 0001	EDN.2M308.XLM
Gerätestecker	8D0-17M08SN	C016 10I008 0021	FGN.2M.308.XLC
Steck-/Zugkraft	111 N	≤ 25 N	14-20 Ncm
Strombelastbarkeit	13 A	12 A	10 A
Kontaktwiderstand	3.8 m Ω	≤ 5 m Ω	≤ 1.5 m Ω
Anschlussquerschnitt	1.5 mm ²	0.14-2.5 mm ²	1.5 mm ²
Geschirmt	Ja	Ja	Ja
Lebensdauer	1500 Zyklen	≥ 500 Zyklen	3000 Zyklen
Gewicht	33.3 g	k. A.	k. A.
Verpolungssicher	Ja	Ja	Ja
Schutzklasse	IP 65	IP 65	IP 68
Werkzeug vorhanden	Nein	Ja	Ja
Preis	366,24 €	96,54 €	130,52 €
Verfügbarkeit	6 Wochen	sofort	n. v.

Tabelle 6.1.: Vergleich der drei ausgewählten Steckverbinder

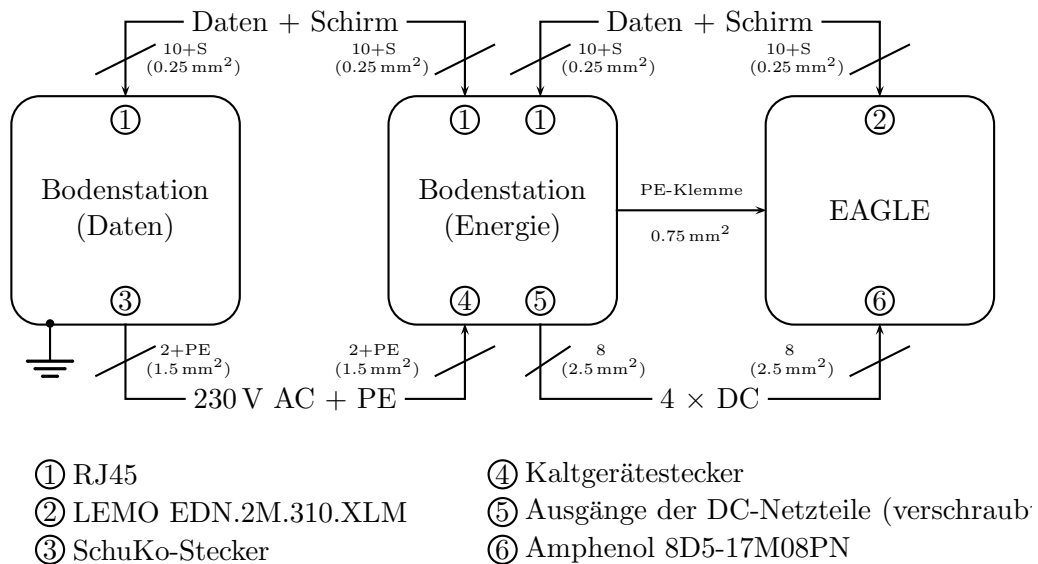


Abbildung 6.1.: Anschlusschema

zwar bis 1.5 mm^2 an, kann aber nur Stecker mit einem maximalen Querschnitt von 1 mm^2 liefern, was für die zu übertragene Leistung zu wenig ist. Für den Anschluss der Datenleitungen eignet sich dieser Verbinder in der 10-poligen Ausführung jedoch sehr gut, daher wird er für diese Anwendung eingesetzt.

Die DC-Energieleitungen werden mit einem Querschnitt von 2.5 mm^2 ausgelegt. Nach

$$R' = \frac{1}{\kappa \cdot A} \quad (6.1)$$

ergibt sich ein $R' = 7.1 \frac{\text{m}\Omega}{\text{m}}$. Der durch den Ladestrom von 3.3 A hervorgerufene Spannungsabfall bei einer Leitungslänge von 2 m beträgt $U = 46.86 \text{ mV}$. Dies ist selbst bei der geringsten zu übertragenden Spannung von 8.4 V zu vertreten. Wechselspannungsseitig wird ein Querschnitt von 0.75 mm^2 benutzt. Dieser ist sehr viel leichter durch das Gelände zu bewegen. Werden alle Akkus gleichzeitig geladen und gibt noch 30% Aufschlag dazu, da eventuell Teile der Peripherie eingeschaltet und versorgt werden, kommt man auf eine Leistung von etwa 200 W . Das ergibt auf der Wechselspannungsseite einen Strom von 0.9 A und bei 50 m einen Spannungsabfall von gerade einmal 1.1 V . Die PE-Klemme wird ebenfalls mit einem Querschnitt von 0.75 mm^2 ausgestattet. Die Schirmung der Datenleitungen wird nicht wie üblich am Eingang aufgelegt, sondern am Massepunkt. Im Falle eines Fehlerstromes würde dieser sonst unter Umständen über das angeschlossene Gerät fließen und könnte dadurch Schäden anrichten.

An den Anschluss des Displays sind keine besonderen Anforderungen gestellt, deshalb wurde auf einen DSUB-15 Stecker zurückgegriffen. In Abbildung 6.1 ist das Anschlussschema und Grounding zu sehen.

6.2. Design des Anschlusspanels

Am Anschlusspanel müssen folgende Anschlüsse und Aussparungen vorgesehen werden:

- $4 \times$ Ladezustandsampeln (jeweils 3 LEDs)
- $4 \times$ Alarm-LEDs (1 pro Akku)
- $4 \times$ Schalter (1 pro Akku)
- $1 \times$ Gerätebuchse Datenleitungen (Lemo)
- $1 \times$ Gerätebuchse Energieleitungen (Amphenol)
- $1 \times$ D-Sub 15 Displayport
- $1 \times$ Schiene zum Anklemmen der Erdung

Die Schiene wurde im Endeffekt umgesetzt mit einem herausgeführten Draht, an dem die Erdklemme angeklemmt wird. Der Draht selber ist fest mit der Struktur über Kabelverschraubungen verbunden.

6. Mechanisches Konzept

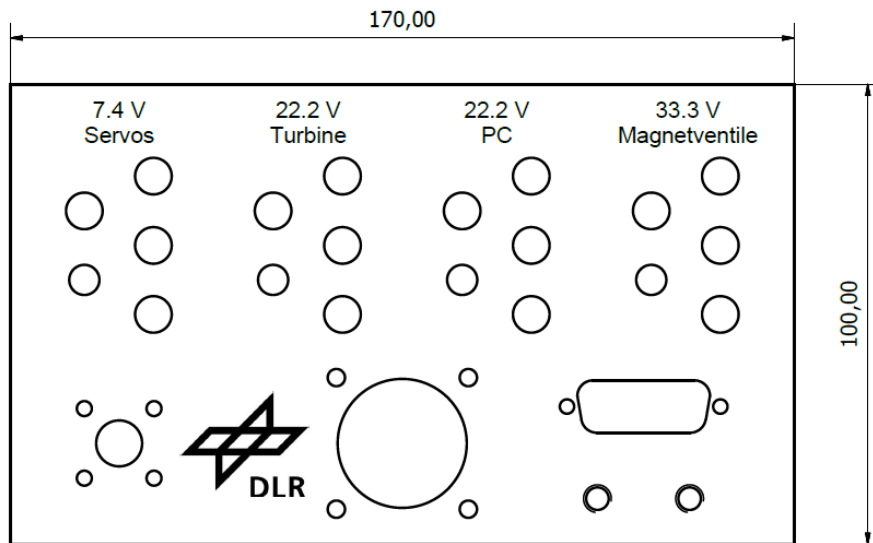


Abbildung 6.2.: Konzeptzeichnung des Anschlusspanels

Für die Schalter wurden vier Flugschalter besorgt. Diese sind Schockfest und können verriegelt werden, so dass während des Fluges ein Ausfall der Elektronik durch Prellen eines Schalters ausgeschlossen ist.

Der Anschluss für die Erdung ist als Draht ausgeführt. Im Panel sind zwei Kabelklemmen nebeneinander herausgeführt, durch die eine 4 mm^2 Ader gezogen werden. Hinter dem Panel ist diese Ader mit dem $1\text{ M}\Omega$ Widerstand verbunden und auf Masse gelegt.

6.3. Anordnung der Komponenten

Die Anordnung der Komponenten auf der Elektronik-Plattform sollte möglichst so geschehen, dass eine sehr geringe Schwerpunktwanderung zu erwarten ist. Außerdem müssen die Leitungen so verlegt werden, dass die Datenübertragung durch Energieleitungen nicht gestört wird. Die Lage des Schwerpunktes berechnet sich wie folgt:

$$\vec{x}_s = \frac{\sum_{i=1}^n \vec{x}_i \cdot m_i}{\sum_{i=1}^n m_i} \quad (6.2)$$

Zur groben Abschätzung der Schwerpunktverschiebung wird die Gewichtskraft jeder einzelnen Komponente als am Mittelpunkt wirkend angesehen. In die Zeichnung der Elektronik-Plattform wurde ein Koordinatensystem gelegt, auf dem die Komponenten angeordnet wurden. \vec{x}_s wurde in $P(0|0)$ gelegt. Mit der in Tabelle 6.2 aufgelisteten Massen konnte die Anordnung in Abbildung 6.3 ermittelt werden, die den Schwerpunkt

6.3. Anordnung der Komponenten

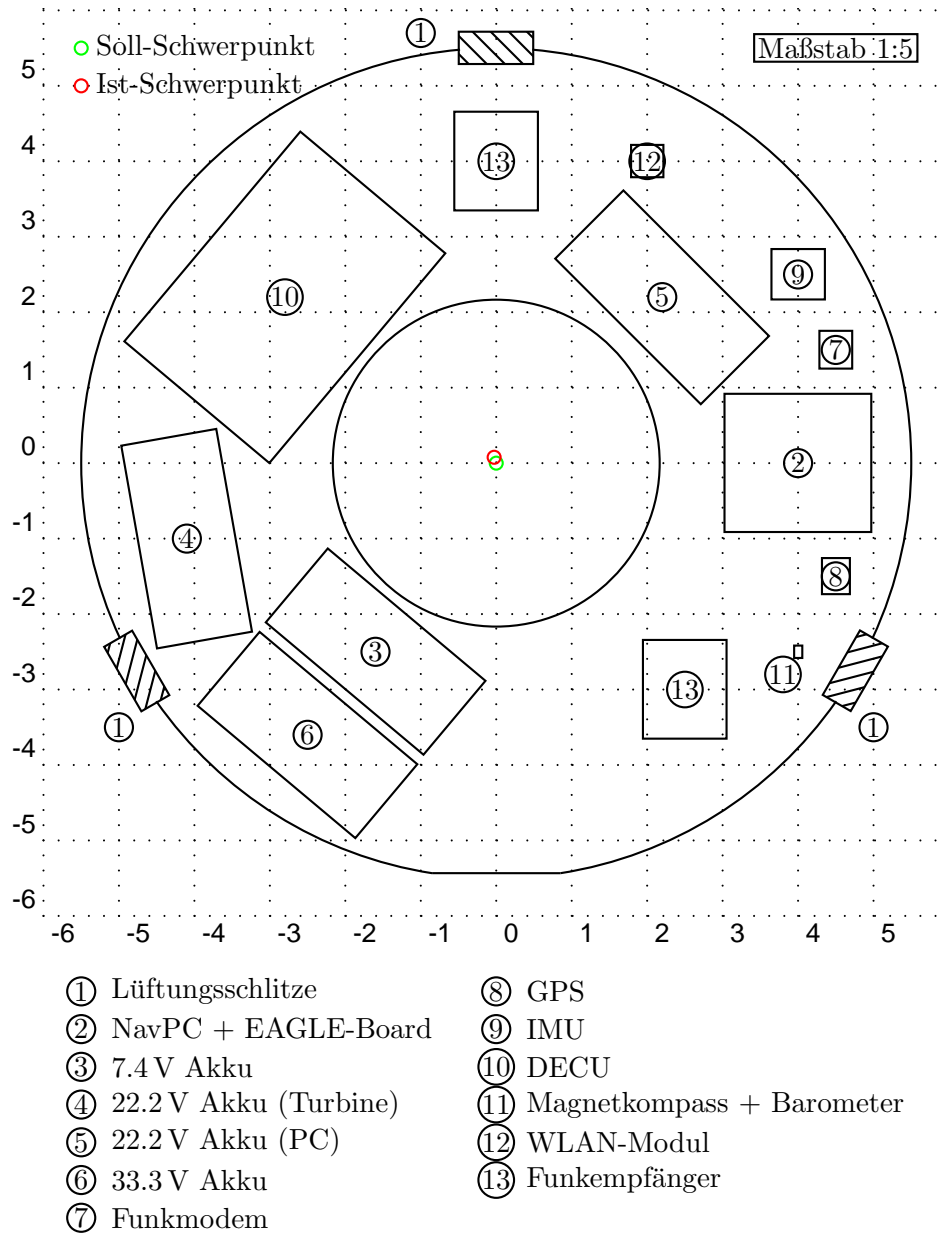


Abbildung 6.3.: Anordnung der Peripherie auf der Elektronikplatte

6. Mechanisches Konzept

Komponente	Gewicht in kg	Position auf E-Plattform in cm
NavPC + EAGLE-Board	0.5438	P(20 0)
7.4 V Akku 3.300 mAh	0.2387	P(-8 -12.5)
22.2 V Akku (Turbine) 2100 mAh	0.3798	P(-20.5 -5)
22.2 V Akku (PC) 1500 mAh	0.25	P(11 11)
33.3 V Akku 1000 mAh	0.2357	P(-12.5 -18)
Wi 232 Funkmodem	0.0086	P(22.5 7.5)
GPS	0.15	P(22.5 -7.5)
AIS MiniIM	0.05	P(20 12.5)
DECU	0.52	P(-14 11)
HMC 5843 Magnetkompass	0.0009	P(20 -12.5)
SCP 1000 Barometer	0.0028	P(20 -12.5)
WLAN	0.1	P(10 20)
1 DDS-8 Funkempfänger	24	P(0 20)
2 DDS-8 Funkempfänger	24	P(12.5 -15)
2.5283		

Tabelle 6.2.: Einzelgewichte und Position der Komponenten auf der E-Plattform

nur wenig verschiebt. Die Verschiebung liegt vom Mittelpunkt aus gesehen somit bei

$$\vec{x}_s = \begin{pmatrix} -0.1397 \\ 0.3888 \end{pmatrix} \text{ cm} \quad (6.3)$$

Dies ist die Schwerpunktverschiebung auf die Platte bezogen. Der EAGLE selber ist mit 25 kg sehr viel schwerer und hat demnach eine noch geringere Abweichung, die bei

$$\vec{x}_s = \begin{pmatrix} -0.0028 \\ 0.0079 \end{pmatrix} \text{ cm} \quad (6.4)$$

liegt.

Um Datenübertragungen nicht zu stören, werden Daten- und Energieleitungen strikt voneinander getrennt. Dies ist geplant, indem alle Energieleitungen am inneren Ring entlanggeführt werden und alle Datenleitungen am äußeren Rand.

7. Testen der Komponenten

Zum Testen wurde zuerst die Platine für den 7.4 V Akku angefertigt. An dieser sollten eventuelle Fehler ausgebessert und auf die anderen Platinen übertragen werden. In Abbildung 7.1 ist die 7.4 V Platine mit Akku und Frontpanel zu sehen. Bei der ersten Inbetriebnahme gab es folgende Probleme:

1. Balancer beendete Balancing-Vorgang erst bei einer Zellenspannung von 2 V
2. FDD4141-PMOS in EAGLE-Library hat falsche Pinbelegung.

Zu Punkt 1 wurde erst vermutet, dass die Hysterese falsch eingestellt war. Nach einem Blick in das Datenblatt des LTC1540 konnte dies jedoch nicht bestätigt werden, da die Hysterese maximal 100 mV betragen kann und nicht wie gemessen über 2 V. Bei Messungen mit dem Oszilloskop fand man heraus, dass der Ausgang des LTC1540 nach Überschreiten der Einschaltspannung anfang, zwischen V_{cc} und GND zu schwingen. Der Grund lag in der indirekten Rückkopplung über die Zellenspannung. Beim Einschalten sinkt diese kurz ab, wodurch der LTC1540 wieder abschaltet. Die Spannung steigt so wieder und der OP schaltet wieder durch. Dieses Verhalten konnte behoben werden, indem ein 100 nF Kondensator zwischen OUT und GND gesetzt wurde.

Punkt 2 wurde erst bemerkt, nachdem der Laderegler seinen Betrieb nicht korrekt aufnahm. Veränderungen der Eingangsspannung durften eigentlich keine Auswirkungen auf den Ladestrom haben, dies war jedoch bei den ersten Tests der Fall. Außerdem konnte dadurch der Ladestrom über die zulässigen Grenzen schreiten. Nach einigen Messungen und Vergleichen des Layouts mit dem Datenblatt wurde herausgefunden, dass die Pinbelegung des FDD4141 in der EAGLE-Library falsch ist, Drain und Source waren vertauscht. Dieser Fehler konnte nur durch eine Hilfskonstruktion ausgebessert werden, da es keinen Ersatz-MOSFET mit der im Layout benutzten Pinbelegung gibt.

Nachdem diese Fehler behoben wurden, konnten Messungen bei mehreren Ladezyklen durchgeführt werden. In Abbildung 7.2 ist der Ladestrom- und Akkuspannungsverlauf dargestellt.

Auffällig ist, dass der Laderegler den Strom nicht bis zum Eintritt der programmierten Ladeschlussspannung konstant hält, sondern diesen nach und nach verringert. Dieses Verhalten trat bei jedem Ladevorgang auf und konnte durch ein Erhöhen der Eingangsspannung verringert werden. Warum sich der Laderegler so verhält, konnte nicht geklärt werden, thermische Vorgänge an den Shuntwiderständen sowie im Laderegler können ausgeschlossen werden, da weder der Laderegler seine Temperatur änderte, noch die Temperaturänderung am Shuntwiderstand eine Nennenswerte Widerstandsänderung nach sich ziehen würde. Durch dieses Verhalten steigt die benötigte Zeit, den Akku zu laden auf etwa 96 min. Das vorher benutzte Graupner-Ladegerät benötigte etwa 70 min.

7. Testen der Komponenten

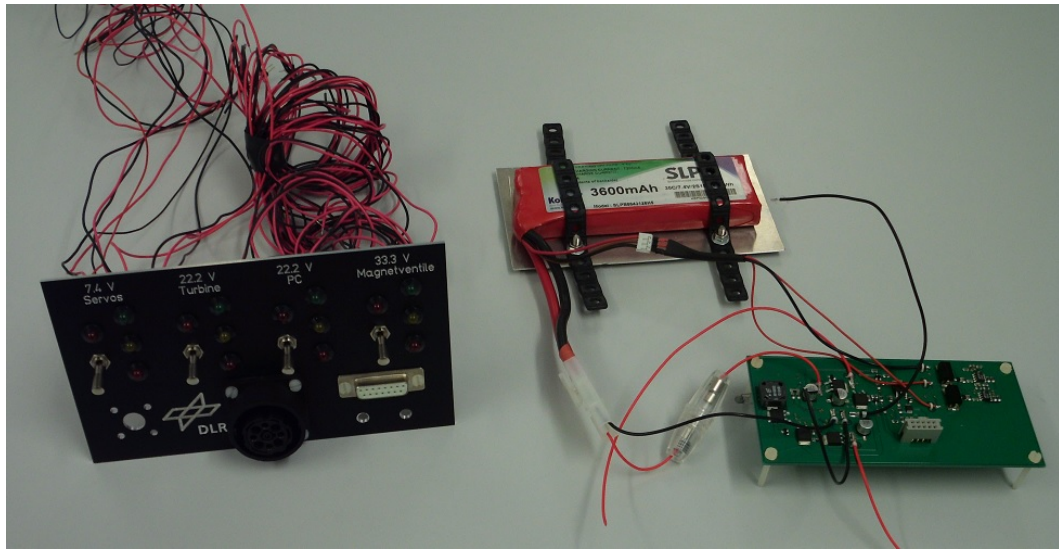


Abbildung 7.1.: Frontpanel mit 7.4 V Akku und dazugehöriger Elektronik

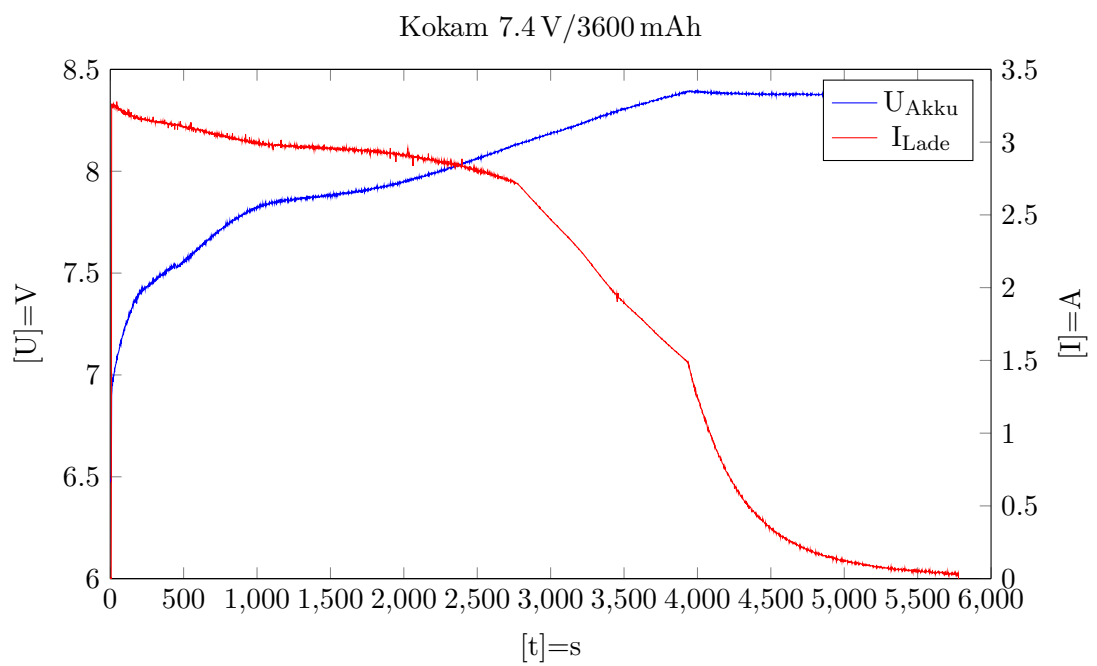


Abbildung 7.2.: Ladezyklus am Kokam 7.4 V/3600 mAh

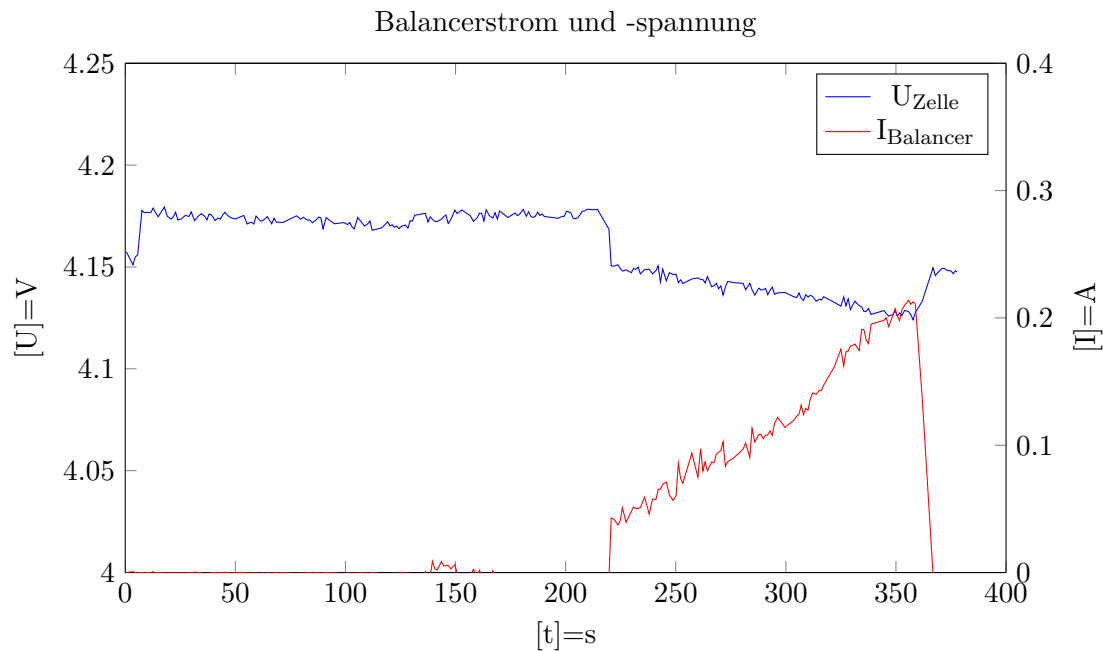


Abbildung 7.3.: Balancingvorgang am Kokam 7.4 V/3600 mAh

Auch der Balancer arbeitet korrekt. In Abbildung 7.3 sind die Zellenspannung und der Balancerstrom dargestellt. Der Anstieg des Stromes kann dadurch erklärt werden, dass der Laderegler weiterhin in Betrieb war. Durch das Abfallen der Zellenspannung wurde der Ladestrom wieder erhöht.

In Abbildung 7.4 ist der Ladestrom während des Einschaltens dargestellt. Der Laderegler begrenzt den Strom beim Einschalten und fährt diesen langsam auf das programmierte Limit hoch. Dadurch ist sicher gestellt, dass der Akku nicht mit einem zu hohen Strom im Einschaltmoment belastet wird.

In Abbildung 7.5 sind Spulenspannung und Ladestrom im eingeschwungenen Zustand zu sehen. Die Schaltfrequenz liegt bei etwa 100 kHz.

Um zu testen, ob die OV/UV-Protektion funktioniert, wurde mit Hilfe eines Funktionsgenerators eine schwankende Spannung simuliert und der Alarm-Ausgang überwacht. Dies ist in Abbildung 7.6 dargestellt.

7. Testen der Komponenten

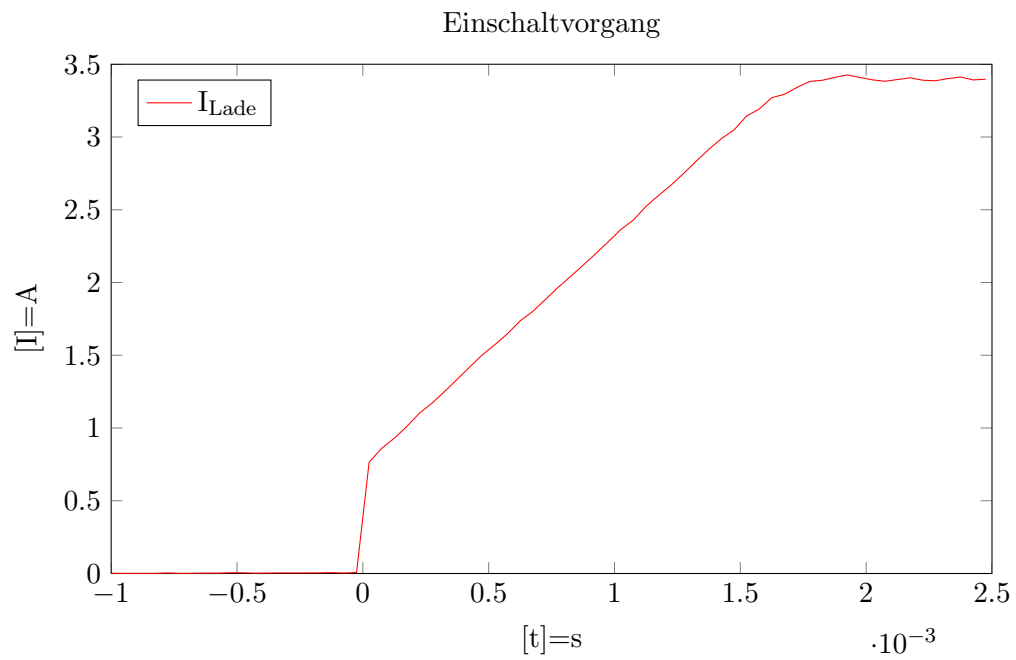


Abbildung 7.4.: Mittelwert des Stroms während des Einschaltens

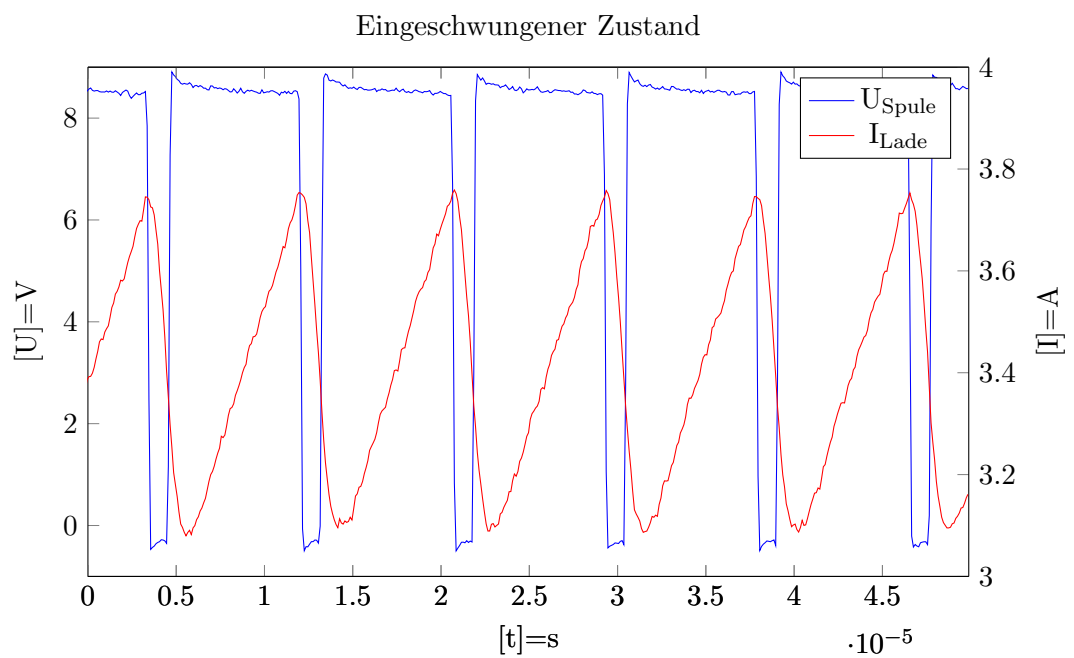


Abbildung 7.5.: Ladestrom und Spulenspannung im eingeschwungenen Zustand

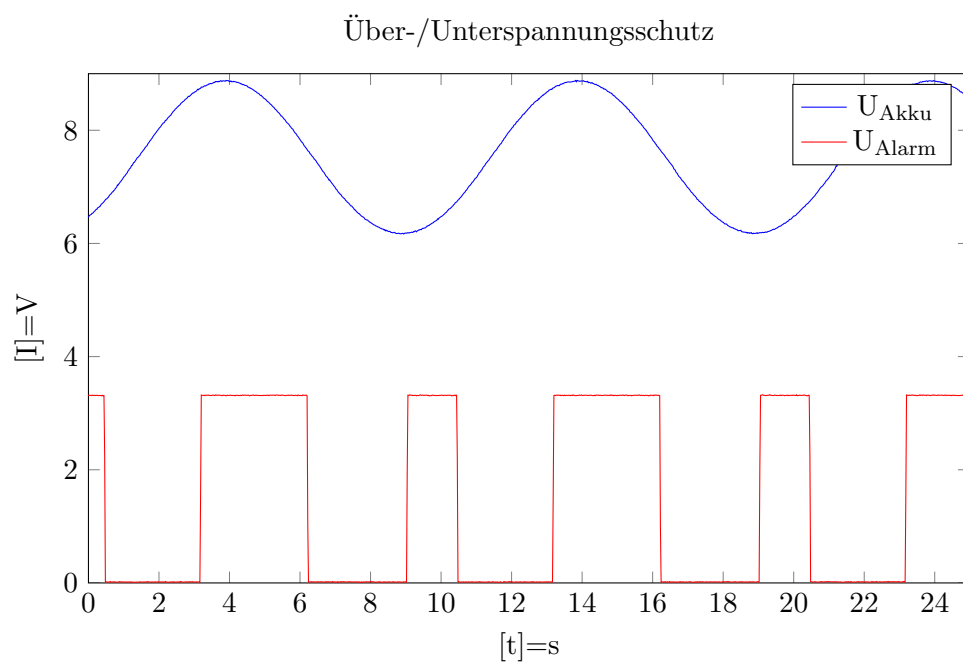


Abbildung 7.6.: Mittelwert des Stroms während des Einschaltens

8. Schlussbetrachtung

Durch das in dieser Arbeit vorgestellte Energiekonzept ist das EAGLE-Projekt einen großen Schritt vorangekommen. Die Frage, wie der EAGLE im Gelände versorgt und aufgeladen wird, ist geklärt und diverse Sicherheitsaspekte wie die Ableitung statischer Aufladung wurden berücksichtigt.

Durch die Verwendung effizienter Elektronik, dem Wegfall einiger unnötiger Schaltungen wie die Servoansteuerung und eine Verringerung der Akkukapazitäten auf ein Minimum konnte das 2012 veranschlagte Gewicht der Elektronikplattform von 3134 g auf 2828 g verringert werden. Dies ist ein Ersparnis von knapp 10 %. Trotzdem werden die Mindestlaufzeiten aller Komponenten eingehalten.

Die Aufzeichnung aus Abbildung 7.2 beweisen, dass das Laden der Akkus sowie das Zusammenarbeiten der Schaltungen untereinander funktioniert. Der Laderegler benötigt durch das Absenken des Ladestroms länger als das Graupner-Ladegerät, lädt den Akku jedoch bis kurz unter seine Kapazitätsgrenze auf, was einen Kapazitätsgewinn von 6 % ausmacht. Die Sicherheit während des Ladevorgangs ist durch die Balancereinheiten gewährleistet, die die Akkuspannung sicher unter dem Grenzwert halten. Die Leistungsaufnahme im Stand-by-Betrieb ist so gering, dass sie mit den zur Verfügung stehenden Messgeräten kaum messbar ist. Dies gewährleistet eine hohe Lagerfähigkeit.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Entwicklung des Energieverteilungskonzepts erfolgreich war. Die Beschaltungen für die Akkus sind energieeffizient und leicht reproduzierbar und das Grouding-Konzept bietet einen soliden Schutz gegen elektrostatische Aufladung. Das Frontpanel ist intuitiv ablesbar und bedienbar, eine Fehlbehandlung z. B. durch Verpolen eines Steckers ausgeschlossen. Zudem ist der Aufbau verhältnismäßig mobil und kann schnell von 1-2 Personen zum EAGLE hin und wieder zurück transportiert werden. Außerdem konnte ein nicht unerheblicher Anteil am Gesamtgewicht eingespart werden, der nun in andere Bereiche einfließen kann, um z. B. die Gesamtkonstruktion stabiler zu machen. Außerdem bietet es sich an, die Ladeschaltungen für andere Anwendungen zu übernehmen, da sie, bis auf die Ladezustandsanzeige, allgemeingültig für alle LiPo und Li-Ion Akkus ist.

Literaturverzeichnis

- [1] BERNDT, Hartmut: *Elektrostatik - Ursache, Wirkungen, Schutzmaßnahmen, Messungen, Prüfungen, Normung*. 3. VDE Verlag, 2009. – ISBN 3800730499
- [2] GEYER, Prof. Dr.-Ing. R.: *Mitschrift der Vorlesung 'Elektronische Schaltungen und Messelektronik'*. 2011
- [3] GEYER, Prof. Dr.-Ing. R.: *Mitschrift der Vorlesung 'Schaltungstechnik mit Operationsverstärkern'*. 2011
- [4] LINEAR TECHNOLOGY (Hrsg.): *LTC1540 - Nanopower Comperator with Reference*. Linear Technology
- [5] LINEAR TECHNOLOGY (Hrsg.): *LTC4008 - 4 A, High Efficiency, Multi-Chemestry Battery Charger*. Linear Technology
- [6] LINEAR TECHNOLOGY (Hrsg.): *LTC4070 - Li-Ion/Polymer Shunt Battery Charger System*. Linear Technology
- [7] LITTLEFUSE (Hrsg.): *MEGA® Bolt-down Fuses*. Littlefuse
- [8] MAXIM (Hrsg.): *MAX11080 - 12-Channel, High-Voltage Battery Pack Fault Monitor*. Maxim
- [9] MICOCHIP (Hrsg.): *MCP6041/2/3/4 - 600 nA, Rail-to-Rail Input/Output Op Amps*. Micochip
- [10] RENKEN, Prof. Dr. F.: *Mitschrift der Vorlesung 'Leistungselektronik'*. 2011
- [11] RETZBACH, Ludwig: *Akkus und Ladetechniken*. 1. Franzis Elektronik, 2008. – ISBN 978-3-7723-4170-0
- [12] STÄMMLER, Michael: *Auslegung und Inbetriebnahme der Sensorik, Aktorik und Avionik eines terristrischen Landefahrzeugs*, Technische Universität Darmstadt, Diplomarbeit, 2010
- [13] TIETZE, Dr.-Ing. U. ; SCHENK, Dr.-Ing. C.: *Halbleiterschaltungstechnik*. 4. Springer-Verlag, 1978. – ISBN 3-540-08628-5
- [14] TRINOGA, Martin ; AHMADKHANI, Omid ; ELSSEN, Michael: *Entwurf und Implementierung einer Schubvektorsteuerung für einen Mondlandedemonstrator*, Universität Bremen, Projektarbeit, 2012

Literaturverzeichnis

- [15] WOHLERS, Christoph: *Entwurf und Konstruktion der Struktur für einen terristischen Landedemonstrator*, Hochschule Bremen, Bachelorarbeit, 2012

A. Anhang

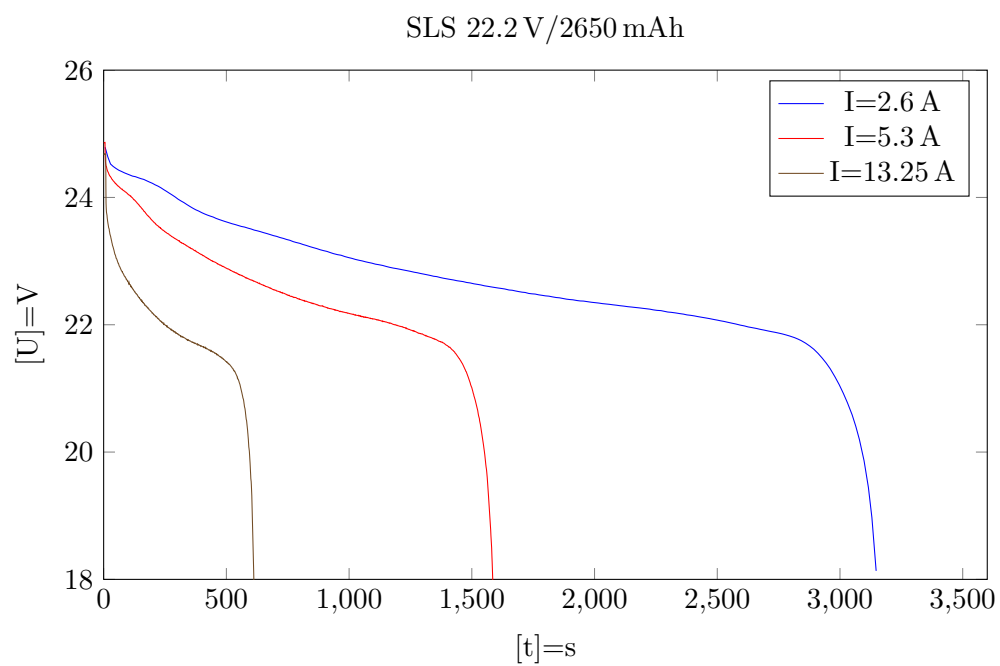


Abbildung A.1.: Entladekennlinie des SLS 22.2 V/2650 mAh

A. Anhang

A.1. 7.4 V Platine

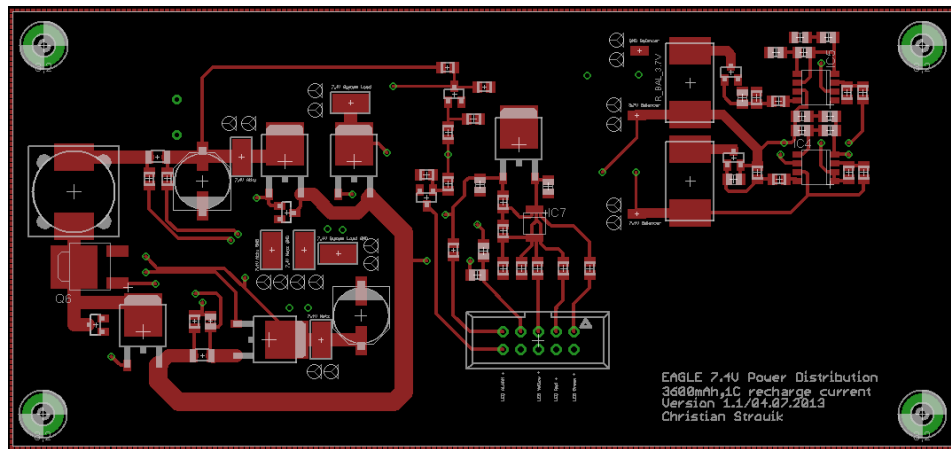


Abbildung A.2.: Top-Layer der 7.4 V-Platine

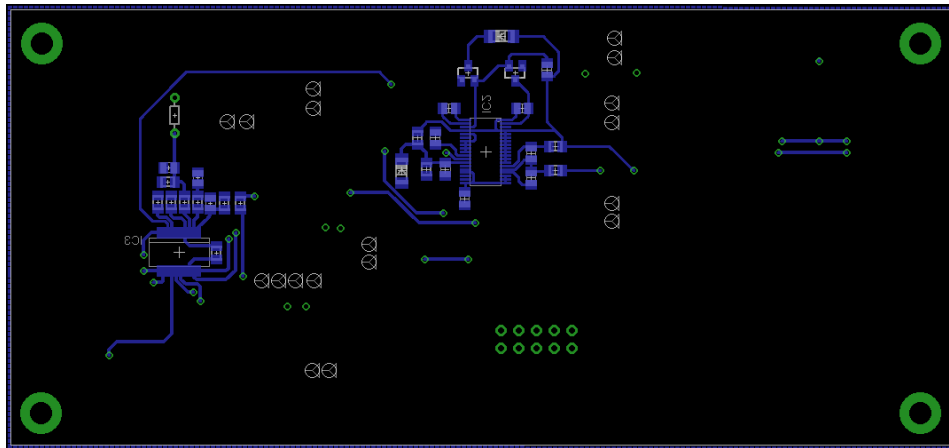
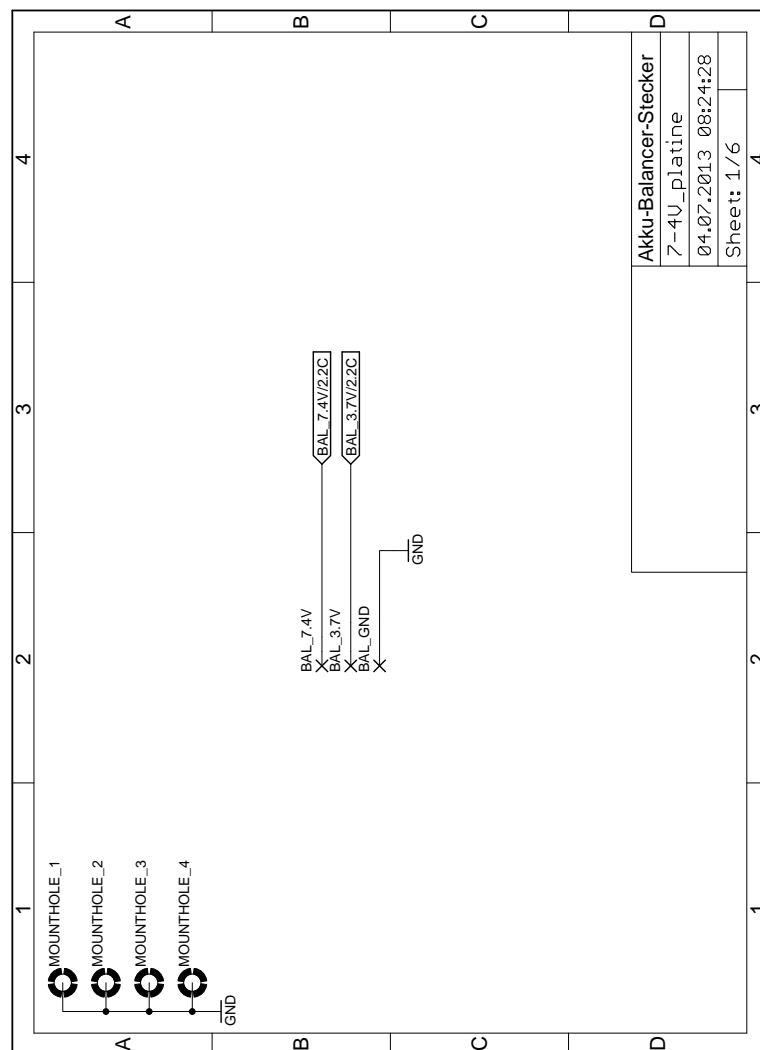
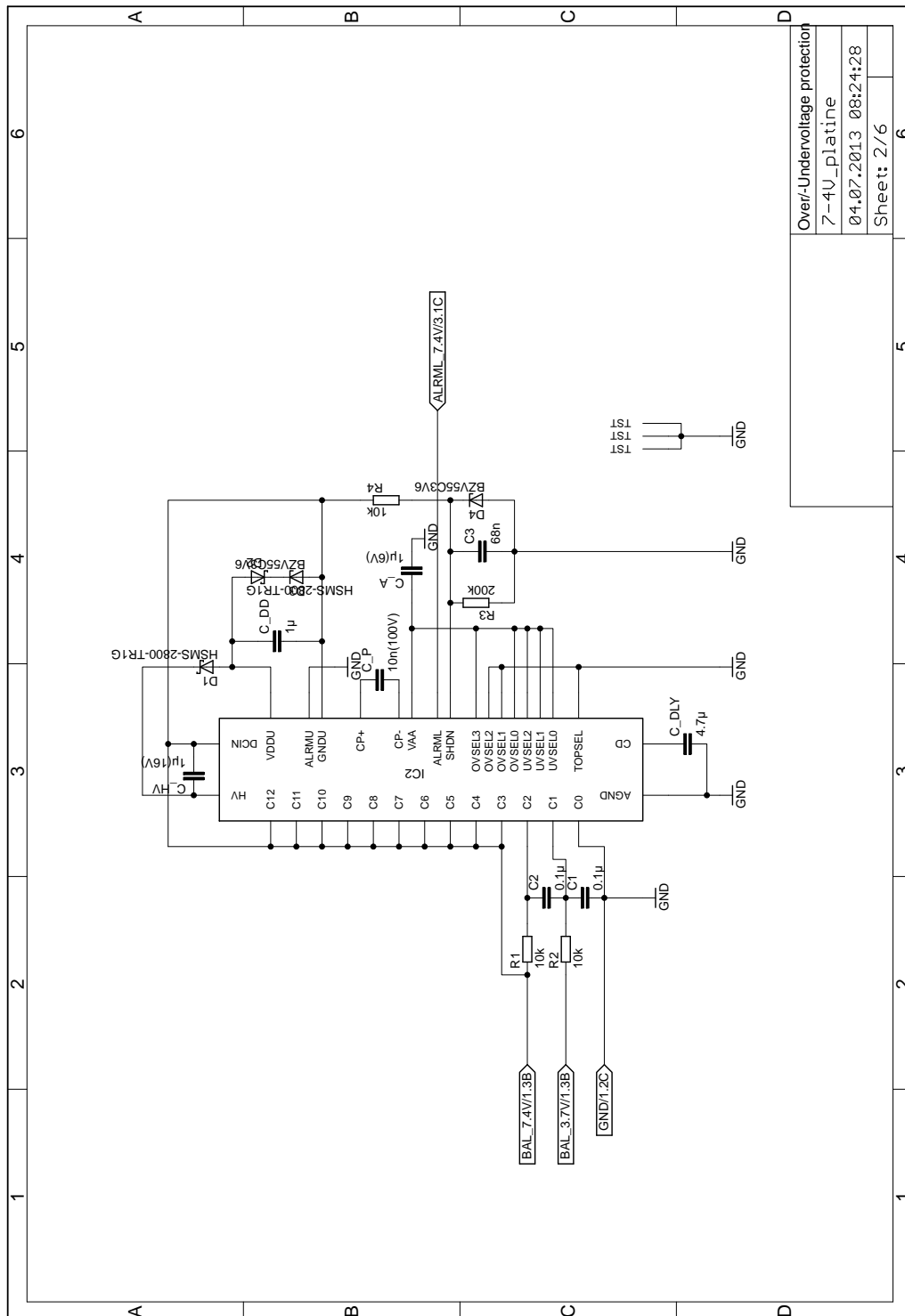
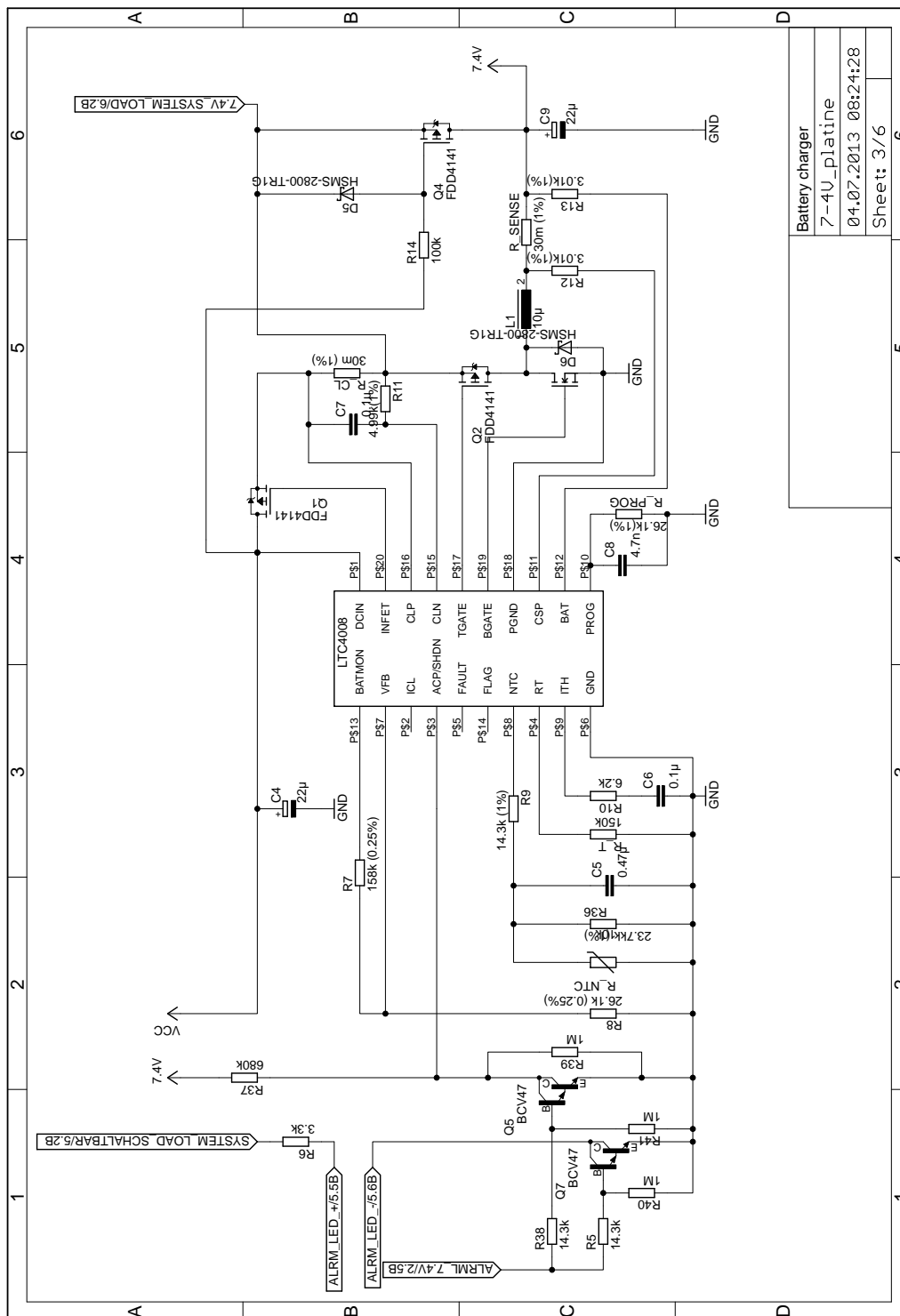
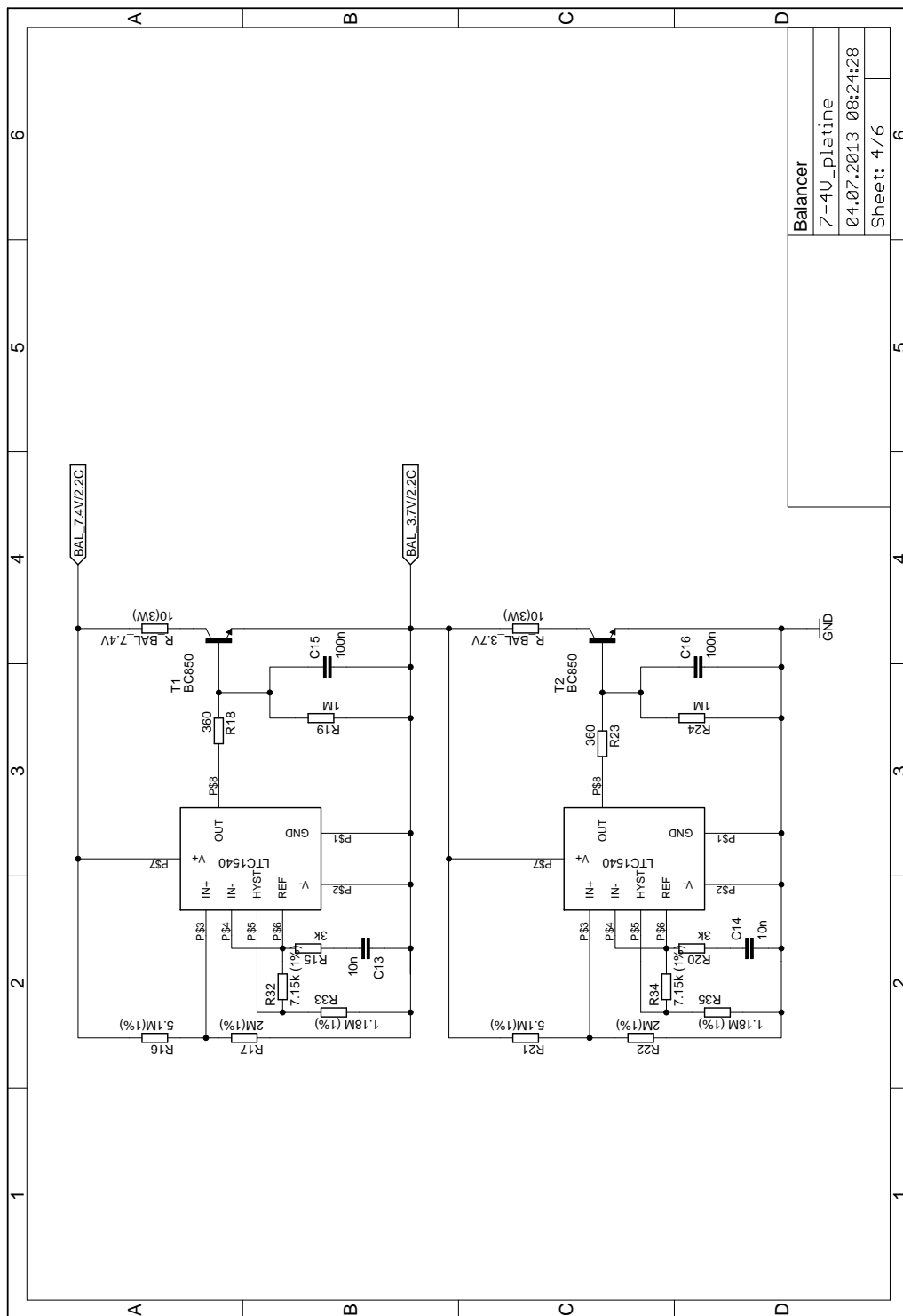


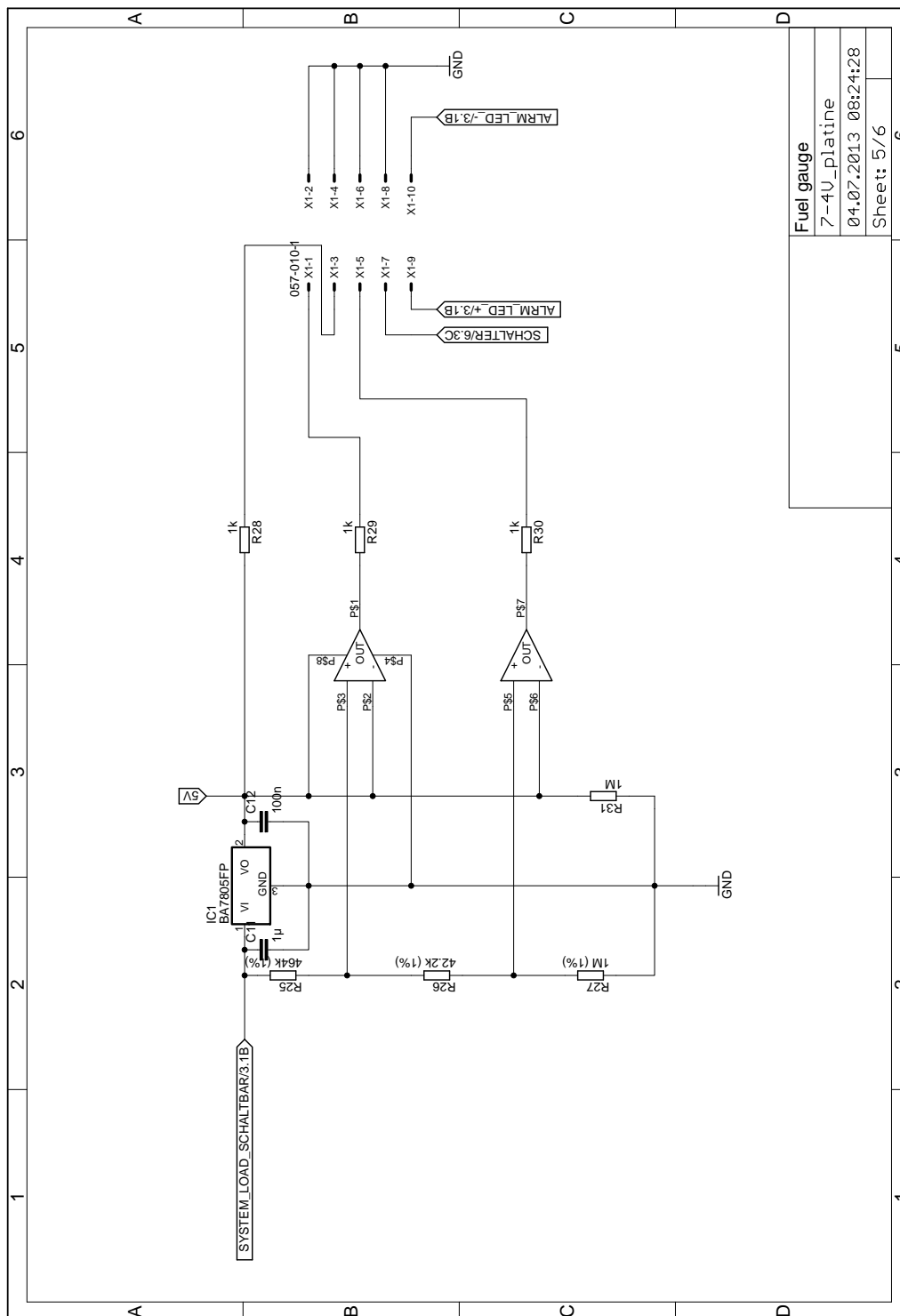
Abbildung A.3.: Bottom-Layer der 7.4 V-Platine

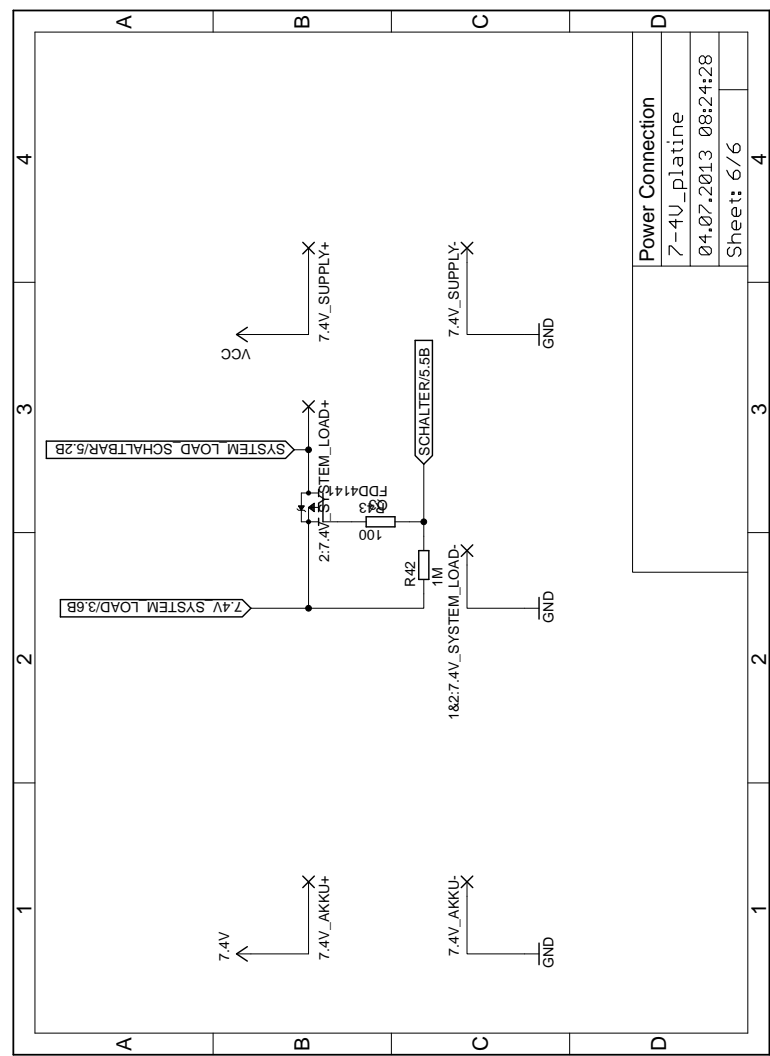












A.2. 14.8 V Platine

Im Folgenden werden die nötigen Berechnungen für den Laderegler des 14.8 V Akkus dargestellt.

Zuerst einige Grenzwerte:

- $U_{\min} = 12 \text{ V}$; $U_{\max} = 16.8 \text{ V}$; $I_{\text{Lade}} = 1\text{C} = 2100 \text{ mA}$; $I_{\text{Lim}} = 3 \text{ A}$
- Voltage Accuracy: $\pm 0.8 \%$
- Charge Current Accuracy: $\pm 4 \%$

Zu großen Ladestrom durch Ungenauigkeit des LTC4008 vermeiden:

$$I_{\text{Lade}} = 2.1 \text{ A} \quad \cong 104 \% \quad (\text{A.1})$$

$$I_{\text{Lade}} = 2.02 \text{ A} \quad \cong 100 \% \quad (\text{A.2})$$

R_{Sense} berechnen:

$$R_{\text{Sense}} = \frac{100 \text{ mV}}{I_{\text{Lade}}} = \frac{100 \text{ mV}}{2.02 \text{ A}} = 0.0495 \Omega \quad (\text{A.3})$$

$$P_{\text{Sense}} = I_{\text{Lade}}^2 \cdot R_{\text{Sense}} = 2.02^2 \text{ A}^2 \cdot 49.9 \text{ m}\Omega = 0.204 \text{ W} \quad (\text{A.4})$$

$$R_{\text{Sense}} = 49.9 \text{ m}\Omega (1 \%) \text{ aus E 96}$$

R_{Prog} berechnen:

$$R_{\text{Prog}} = \frac{U_{\text{Ref}} \cdot 3.01 \text{ k}\Omega}{R_{\text{Sense}} \cdot I_{\text{Lade}} + 0.035 \text{ V}} = \frac{1.19 \text{ V} \cdot 3.01 \text{ k}\Omega}{49.9 \text{ m}\Omega \cdot 2.02 \text{ A} + 0.035 \text{ V}} = 26.38 \text{ k}\Omega \quad (\text{A.5})$$

$$R_{\text{Prog}} = 26.7 \text{ k}\Omega (1 \%) \text{ aus E 24}$$

R₁, R₂ und R₃ für 14.8 V Akku berechnen:

Bei den in Abbildung A.5 markierten Spannungen von 22.5 V und 21 V besitzt der Akku noch eine Restkapazität von 60 % bzw. 20 %. Mit diesen Werten werden die Widerstände berechnet. R₃ wird wieder mit 1 M Ω (1 %) bestimmt. Da R₃, U₂₃ und U_{Akku} bekannt sind, können die fehlenden Widerstände berechnet werden:

$$R_2 = \frac{5 \text{ V}}{14.8 \text{ V}} \cdot \left(\frac{15.3 \text{ V}}{5 \text{ V}} \cdot 1 \text{ M}\Omega - 1 \text{ M}\Omega + 1 \text{ M}\Omega \right) - 1 \text{ M}\Omega = 33.78 \text{ k}\Omega \quad (\text{A.6})$$

$$R_1 = \frac{15.3 \text{ V}}{5 \text{ V}} \cdot 1 \text{ M}\Omega - 34 \text{ k}\Omega - 1 \text{ M}\Omega = 2.026 \text{ M}\Omega \quad (\text{A.7})$$

$$R_1 = 2.05 \text{ M}\Omega (1 \%) \text{ aus E48}$$

$$R_2 = 34 \text{ k}\Omega (1 \%) \text{ aus E48}$$

A. Anhang

$R_3 = 1\text{ M}\Omega(1\%)$ aus E48

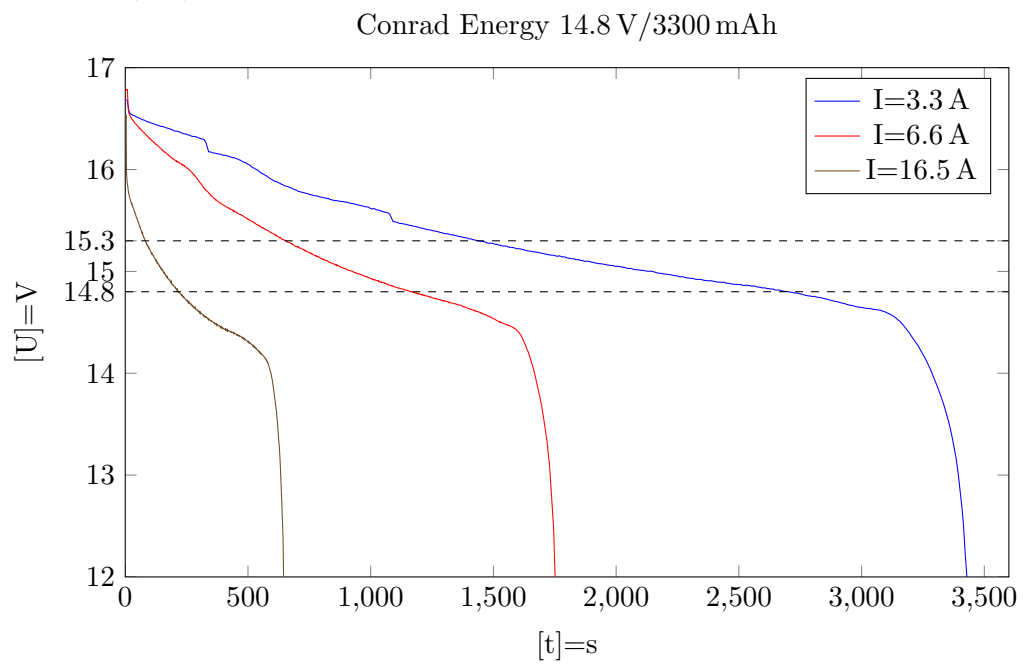


Abbildung A.5.: Entladekennlinie des Conrad Energy 14.8 V/3300 mAh

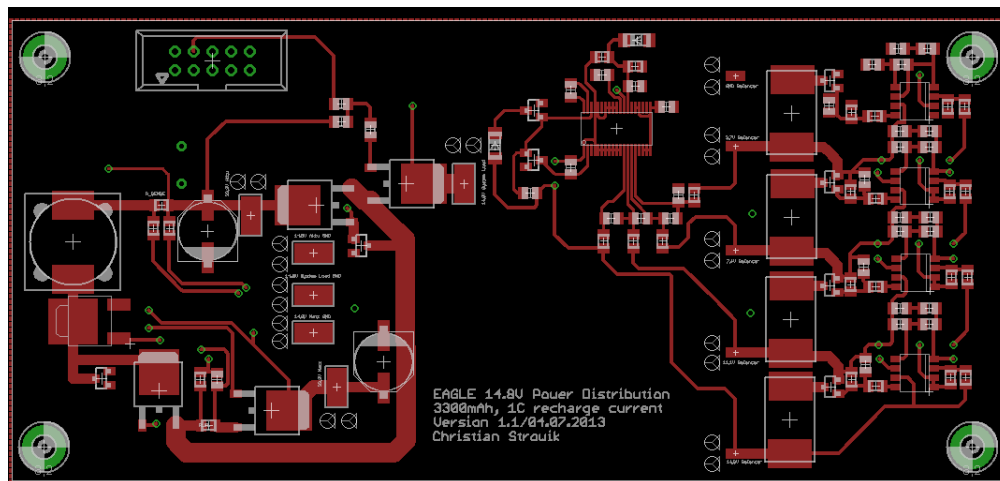


Abbildung A.6.: Top-Layer der 14.8 V-Platine

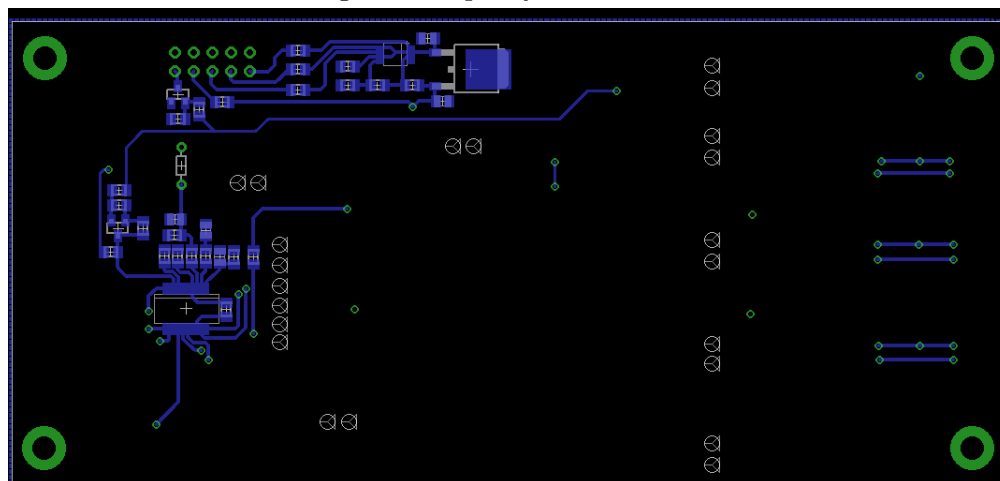
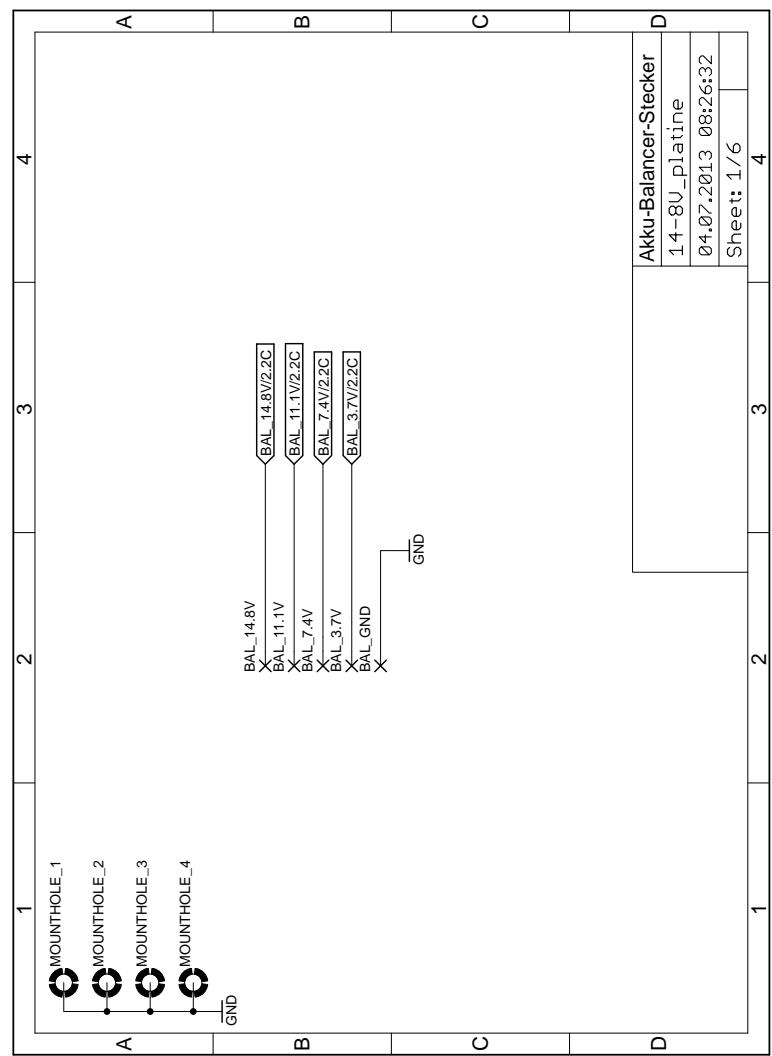
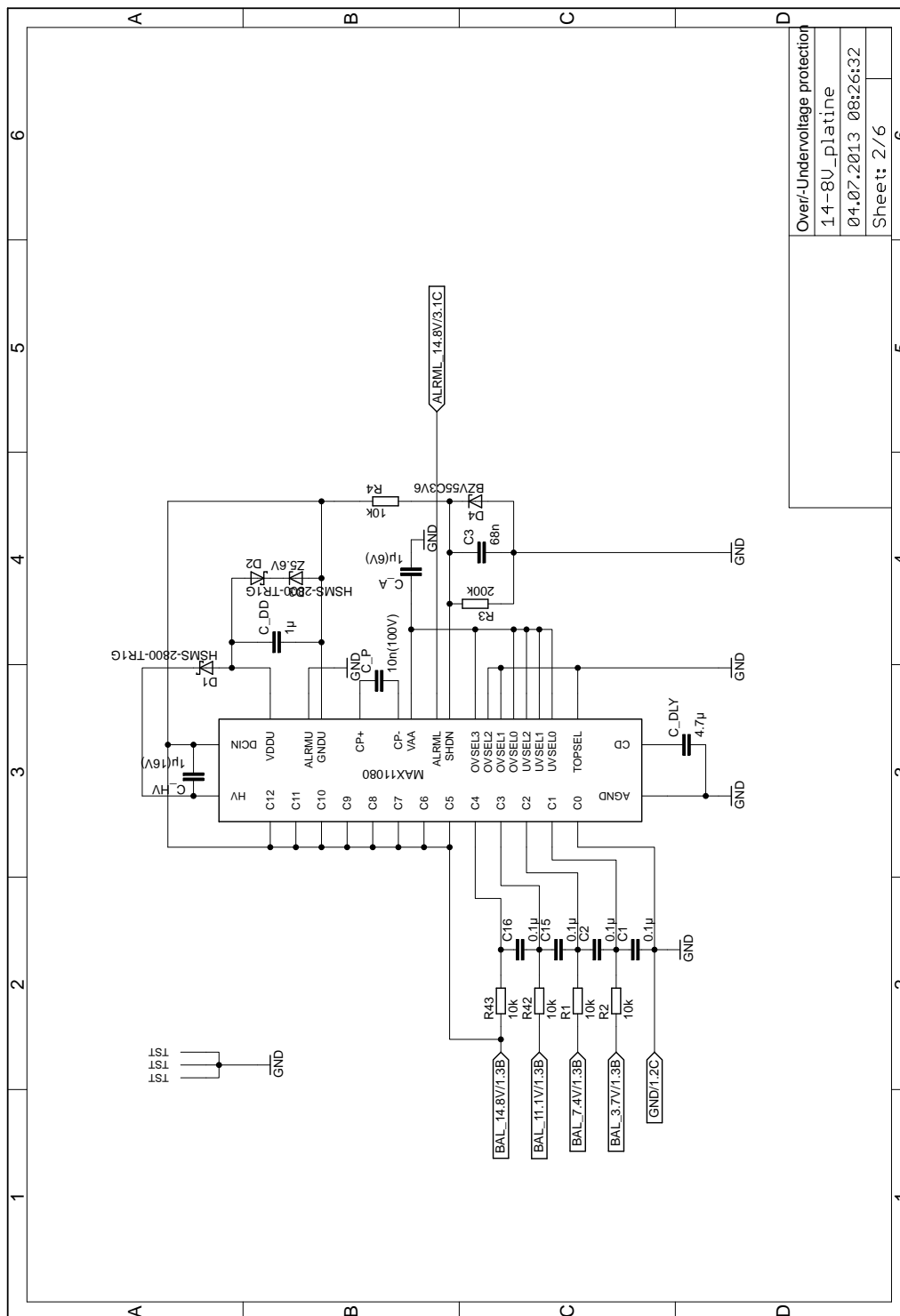
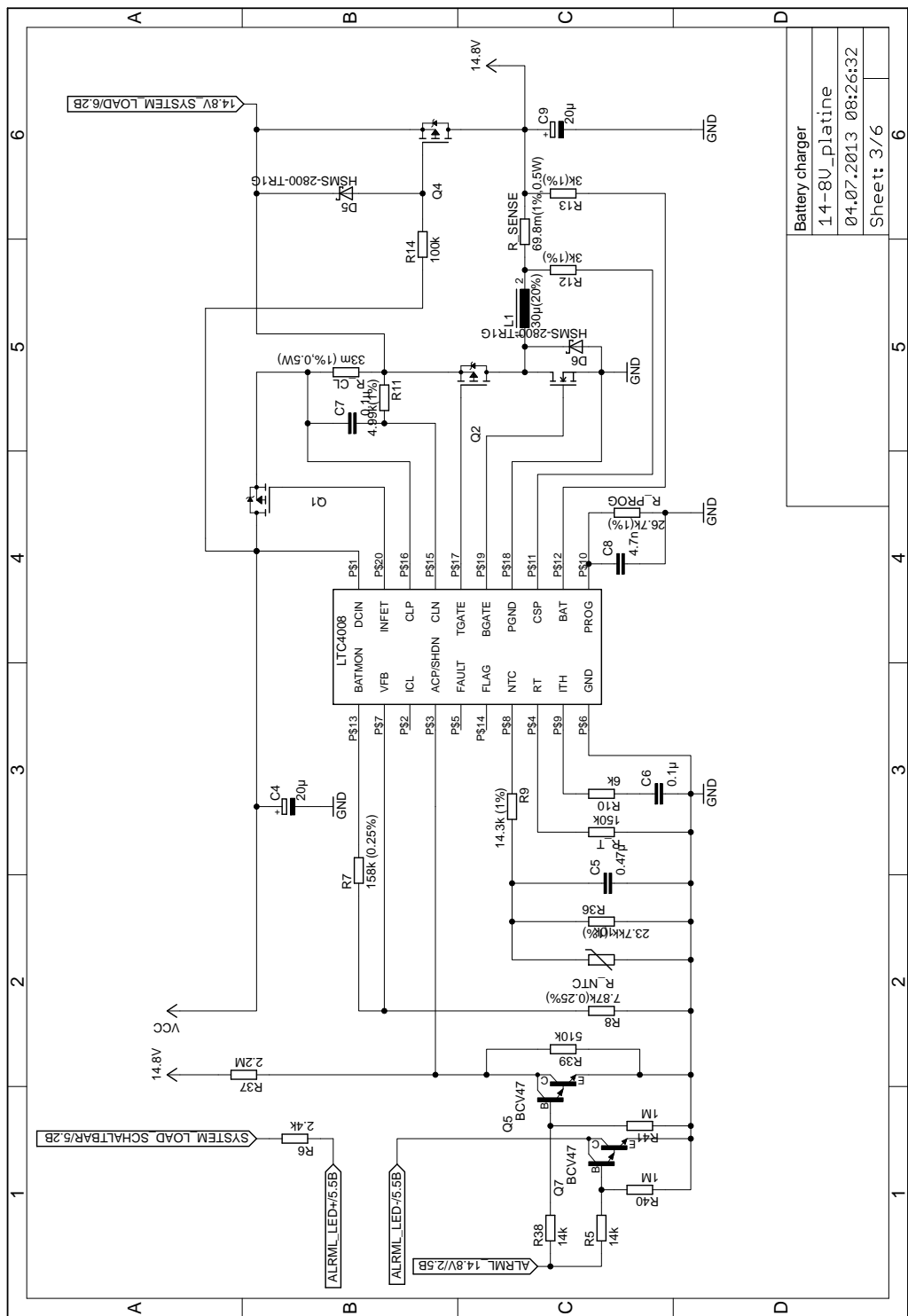


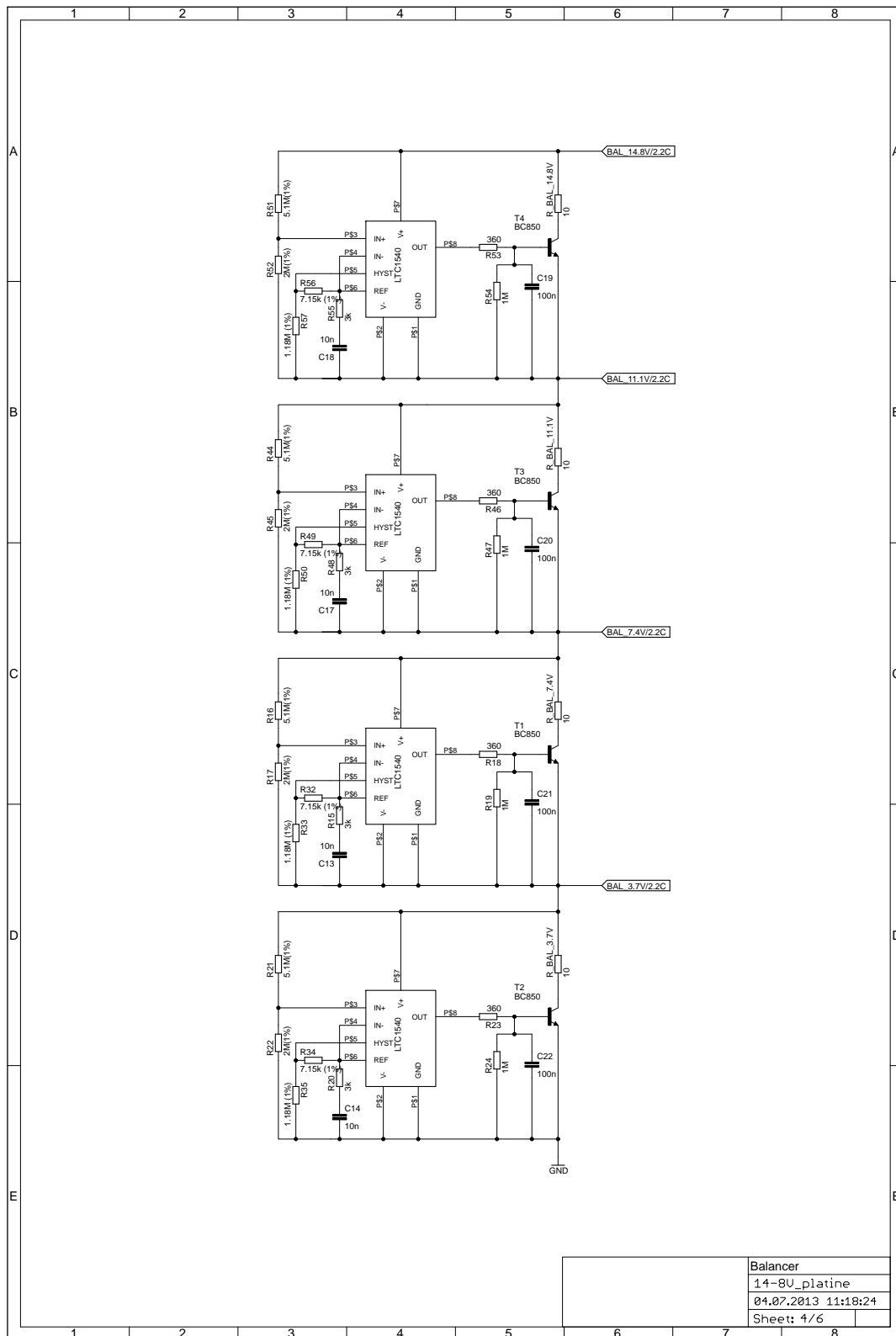
Abbildung A.7.: Bottom-Layer der 14.8 V-Platine

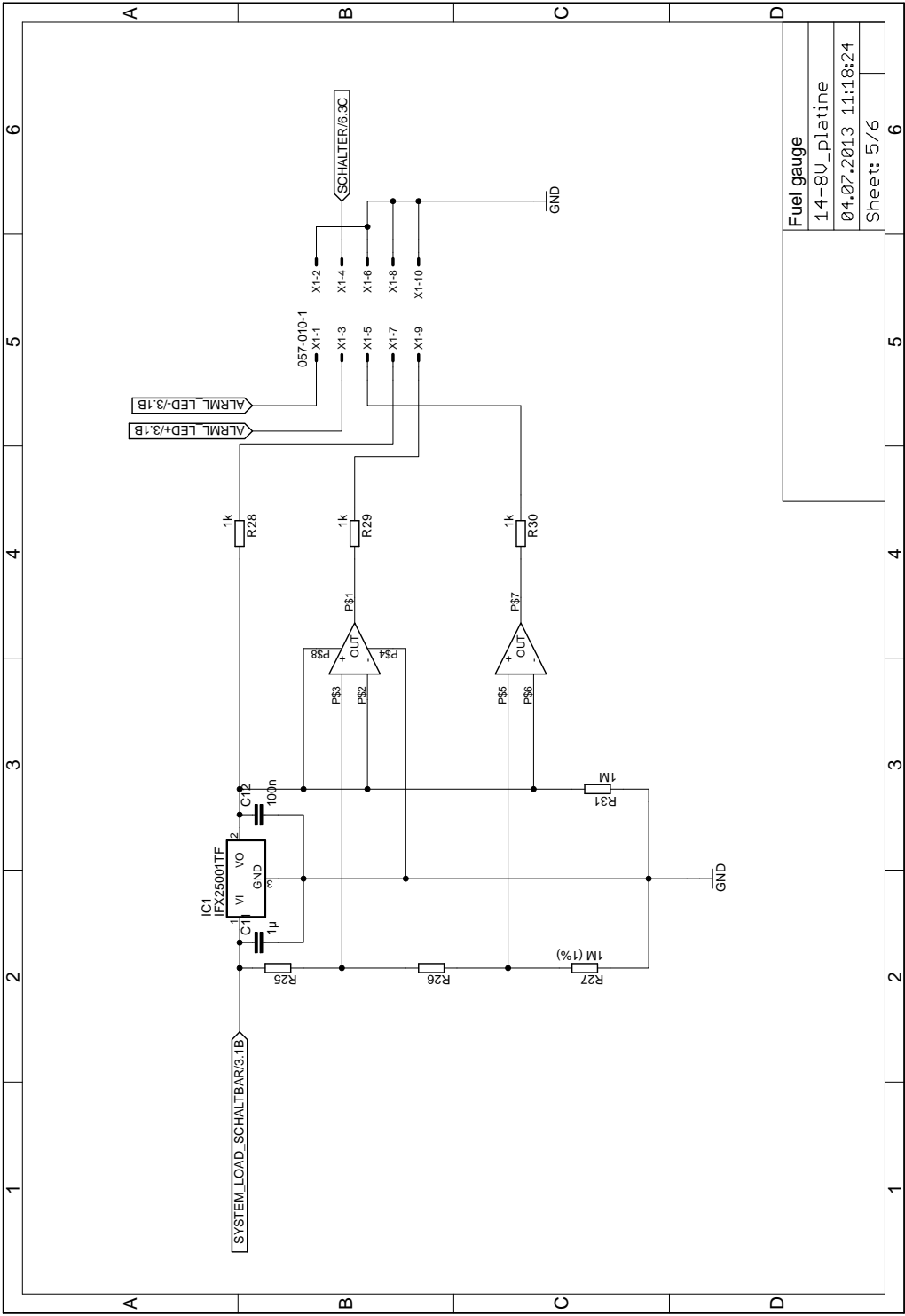






Battery charger		
14-8U_platine		
04.07.2013 08:26:32		
Sheet: 3/6		





A.3. 22.2 V Platine (PC)

Berechnungen für den LTC4008 Laderegler

Im Folgenden werden die nötigen Berechnungen für den Laderegler des 22.2 V Akkus dargestellt.

Zuerst einige Grenzwerte:

- $U_{\min} = 18 \text{ V}$; $U_{\max} = 25.2 \text{ V}$; $I_{\text{Lade}} = 1 \text{ C} = 1500 \text{ mA}$; $I_{\text{Lim}} = 3 \text{ A}$
- Voltage Accuracy: $\pm 0.8 \%$
- Charge Current Accuracy: $\pm 4 \%$

Zu großen Ladestrom durch Ungenauigkeit des LTC4008 vermeiden:

$$I_{\text{Lade}} = 1.5 \text{ A} \quad \hat{=} 104 \% \quad (\text{A.8})$$

$$I_{\text{Lade}} = 1.44 \text{ A} \quad \hat{=} 100 \% \quad (\text{A.9})$$

R_{Sense} berechnen:

$$R_{\text{Sense}} = \frac{100 \text{ mV}}{I_{\text{Lade}}} = \frac{100 \text{ mV}}{1.44 \text{ A}} = 0.0694 \Omega \quad (\text{A.10})$$

$$P_{\text{Sense}} = I_{\text{Lade}}^2 \cdot R_{\text{Sense}} = 1.44^2 \text{ A}^2 \cdot 69.8 \text{ m}\Omega = 0.145 \text{ W} \quad (\text{A.11})$$

$$R_{\text{Sense}} = 69.8 \text{ m}\Omega (1 \%) \text{ aus E 24}$$

R_{Prog} berechnen:

$$R_{\text{Prog}} = \frac{U_{\text{Ref}} \cdot 3.01 \text{ k}\Omega}{R_{\text{Sense}} \cdot I_{\text{Lade}} + 0.035 \text{ V}} = \frac{1.19 \text{ V} \cdot 3.01 \text{ k}\Omega}{69.8 \text{ m}\Omega \cdot 1.44 \text{ A} + 0.035 \text{ V}} = 26.43 \text{ k}\Omega \quad (\text{A.12})$$

$$R_{\text{Prog}} = 26.7 \text{ k}\Omega (1 \%) \text{ aus E 24}$$

R_7 und R_8 für $U_{\text{Lade}} = 22.2 \text{ V}$ bestimmen [6, S. 14, Table 3]:

Nicht vorhanden, somit Berechnung. Für R_8 wird $158 \text{ k}\Omega$ angenommen.

$$R_7 = \frac{R_8}{\frac{U_{\max}}{1.19 \text{ V}} - 1} = \frac{158 \text{ k}\Omega}{\frac{25 \text{ V}}{1.19 \text{ V}} - 1} = 7.89 \text{ k}\Omega \quad (\text{A.13})$$

$$R_8 = 158 \text{ k}\Omega (0.25 \%) \text{ aus E 96}$$

$$R_7 = 7.87 \text{ k}\Omega (0.25 \%) \text{ aus E 96}$$

L_1 bestimmen [6, S. 15, Table 4]:

Maximum average current: 2 A

Input Voltage $\geq 20 \text{ V}$

$$L_1 = 30 \mu\text{H} (\pm 20 \%)$$

A.3. 22.2 V Platine (PC)

R_{CL} berechnen:

$$R_{CL} = \frac{100 \text{ mV}}{I_{Lim}} = \frac{100 \text{ mV}}{3 \text{ A}} = 33.3 \text{ m}\Omega \quad (\text{A.14})$$

$$P_{CL} = I_{Lade}^2 \cdot R_{CL} = 3^2 \text{ A}^2 \cdot 33 \text{ m}\Omega = 0.297 \text{ W} \quad (\text{A.15})$$

R_{CL} = 33 mΩ (1 %, 0.5 W) aus E 48

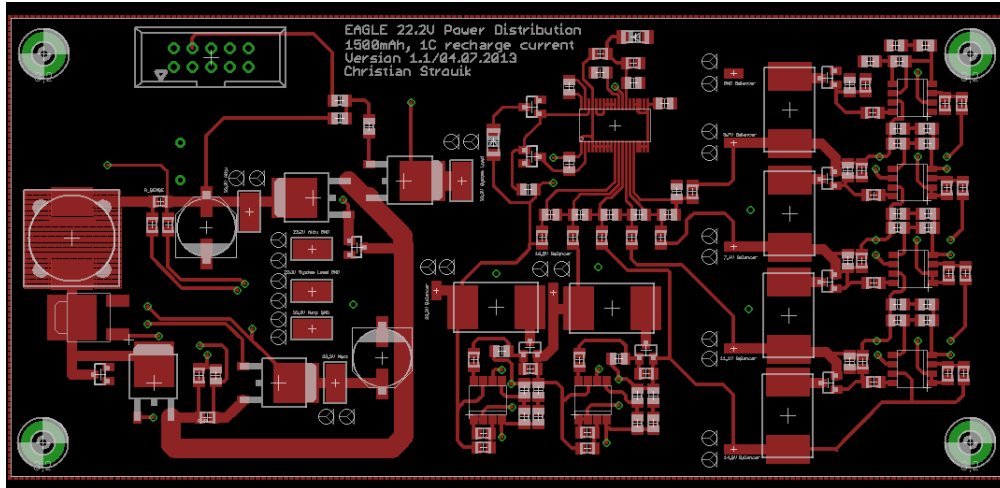


Abbildung A.9.: Top-Layer der 22.2 V-PC-Platine

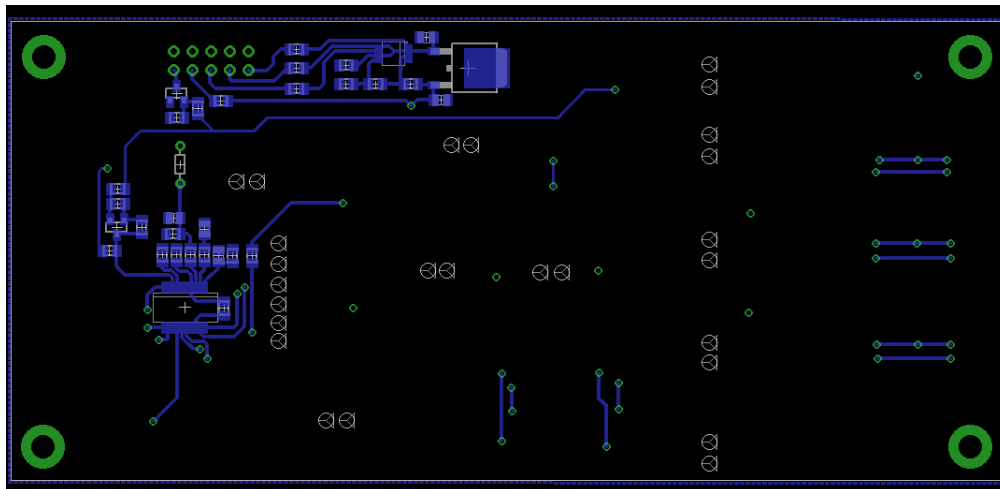
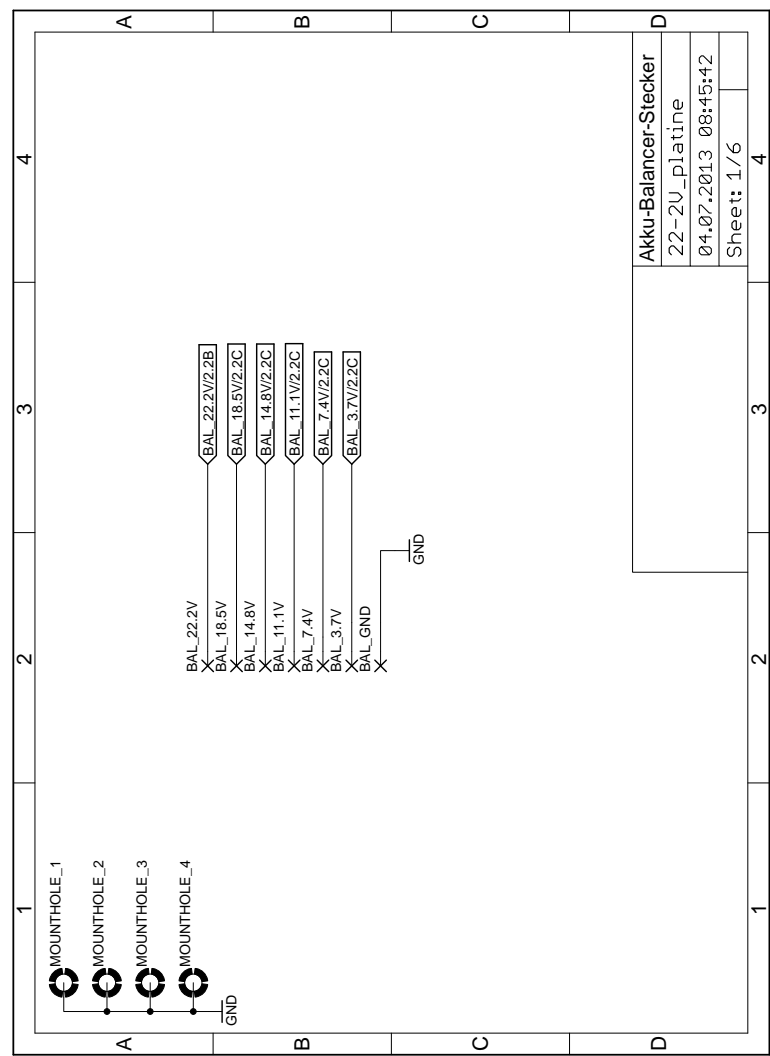
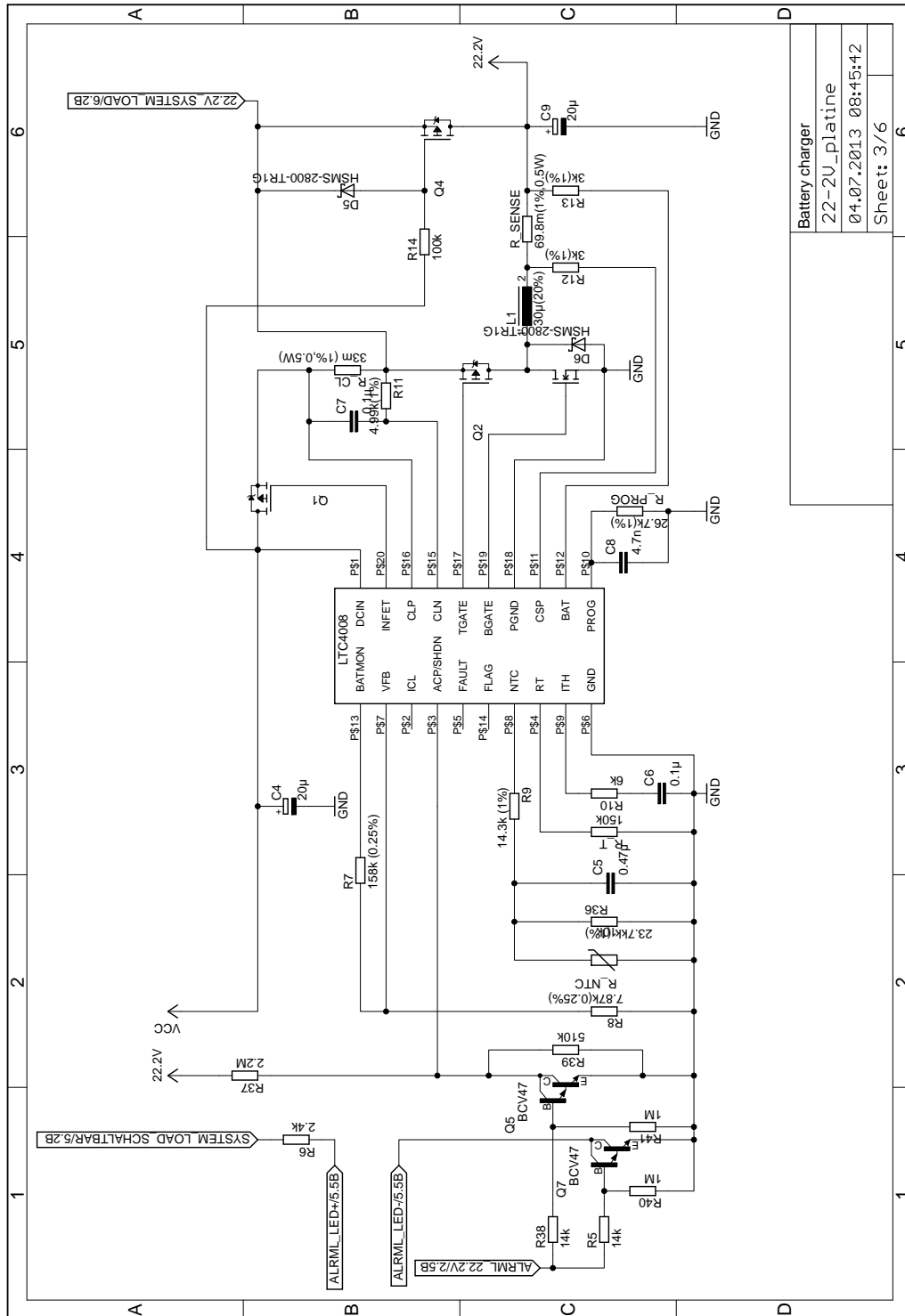
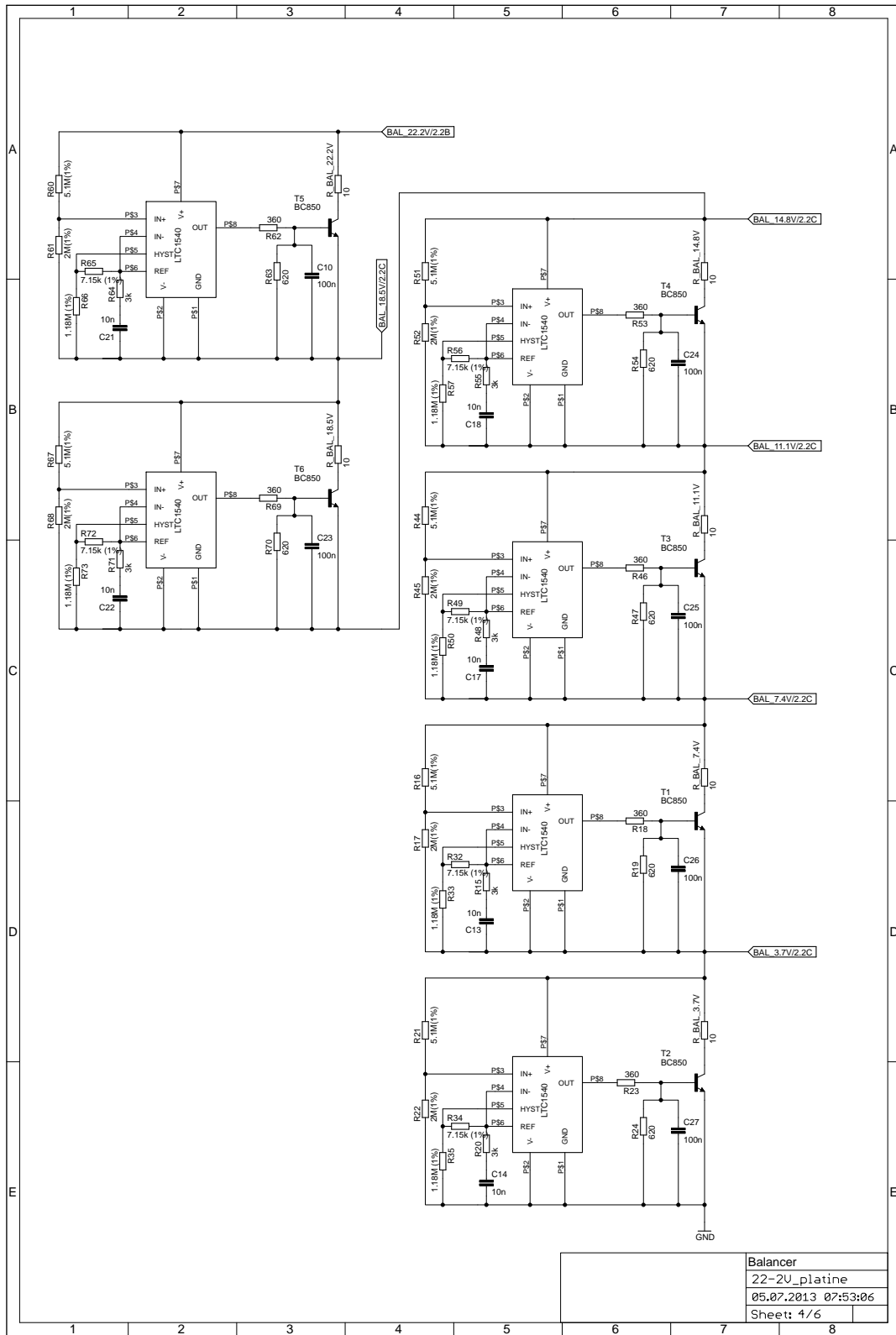
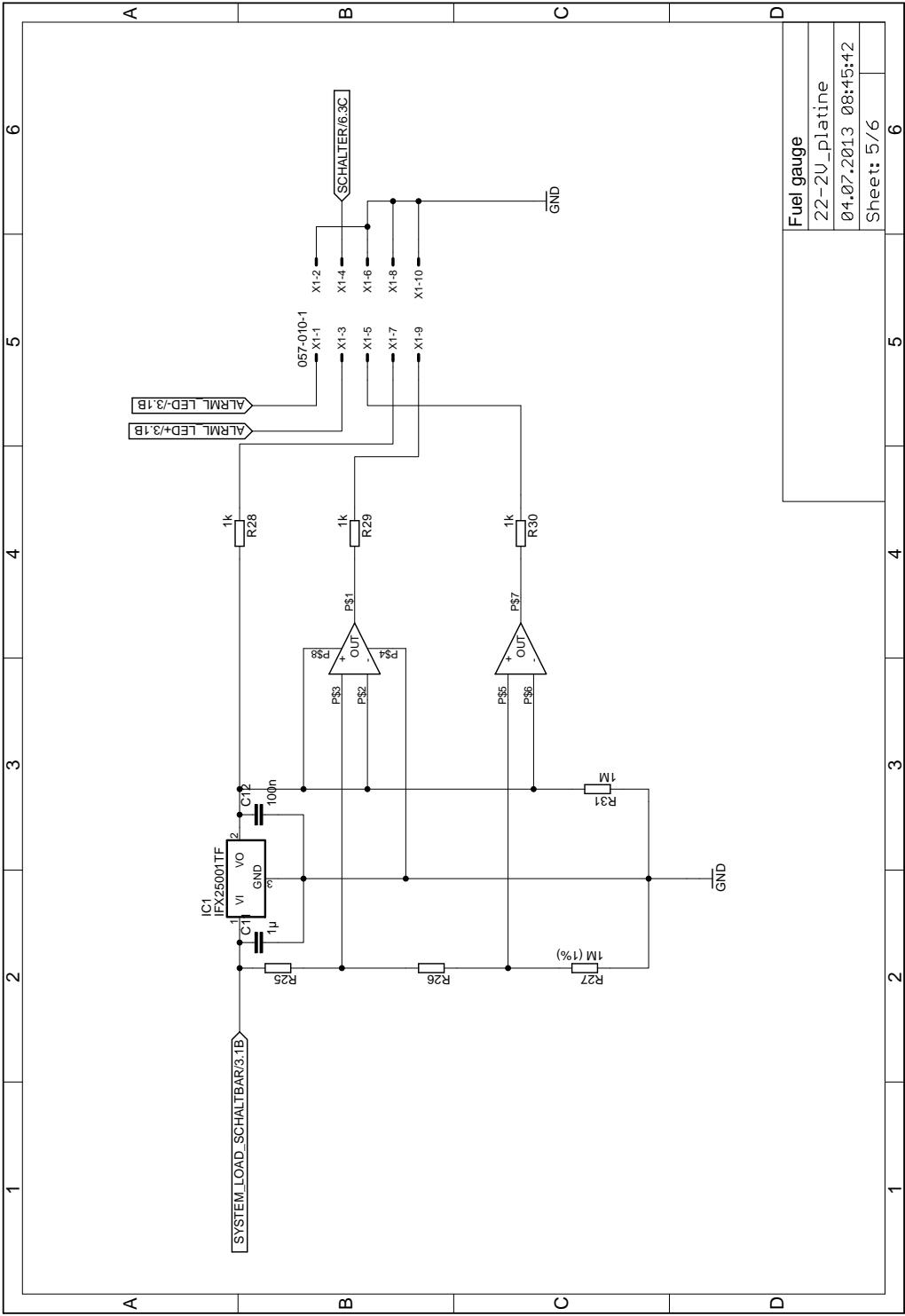


Abbildung A.10.: Bottom-Layer der 22.2 V-PC-Platine









A.4. 22.2 V Platine (Turbine)

Berechnungen für den LTC4008 Laderegler

Im Folgenden werden die nötigen Berechnungen für den Laderegler des 22.2 V Akkus dargestellt.

Zuerst einige Grenzwerte:

- $U_{\min} = 18 \text{ V}$; $U_{\max} = 25.2 \text{ V}$; $I_{\text{Lade}} = 1 \text{ C} = 2100 \text{ mA}$; $I_{\text{Lim}} = 3 \text{ A}$
- Voltage Accuracy: $\pm 0.8 \%$
- Charge Current Accuracy: $\pm 4 \%$

Zu großen Ladestrom durch Ungenauigkeit des LTC4008 vermeiden:

$$I_{\text{Lade}} = 2.1 \text{ A} \quad \hat{=} 104 \% \quad (\text{A.16})$$

$$I_{\text{Lade}} = 2.02 \text{ A} \quad \hat{=} 100 \% \quad (\text{A.17})$$

R_{Sense} berechnen:

$$R_{\text{Sense}} = \frac{100 \text{ mV}}{I_{\text{Lade}}} = \frac{100 \text{ mV}}{2.02 \text{ A}} = 0.0495 \Omega \quad (\text{A.18})$$

$$P_{\text{Sense}} = I_{\text{Lade}}^2 \cdot R_{\text{Sense}} = 2.02^2 \text{ A}^2 \cdot 49.9 \text{ m}\Omega = 0.204 \text{ W} \quad (\text{A.19})$$

$$R_{\text{Sense}} = 49.9 \text{ m}\Omega (1 \%) \text{ aus E 96}$$

R_{Prog} berechnen:

$$R_{\text{Prog}} = \frac{U_{\text{Ref}} \cdot 3.01 \text{ k}\Omega}{R_{\text{Sense}} \cdot I_{\text{Lade}} + 0.035 \text{ V}} = \frac{1.19 \text{ V} \cdot 3.01 \text{ k}\Omega}{49.9 \text{ m}\Omega \cdot 2.02 \text{ A} + 0.035 \text{ V}} = 26.38 \text{ k}\Omega \quad (\text{A.20})$$

$$R_{\text{Prog}} = 26.7 \text{ k}\Omega (1 \%) \text{ aus E 96}$$

R₇ und R₈ für U_{Lade} = 22.2 V bestimmen [6, S. 14, Table 3]:

Nicht vorhanden, somit Berechnung. Für R₈ wird 158 k Ω angenommen.

$$R_7 = \frac{R_8}{\frac{U_{\max}}{1.19 \text{ V}} - 1} = \frac{158 \text{ k}\Omega}{\frac{25 \text{ V}}{1.19 \text{ V}} - 1} = 7.89 \text{ k}\Omega \quad (\text{A.21})$$

$$R_8 = 158 \text{ k}\Omega (0.25 \%) \text{ aus E 96}$$

$$R_7 = 7.87 \text{ k}\Omega (0.25 \%) \text{ aus E 96}$$

L₁ bestimmen [6, S. 15, Table 4]:

Maximum average current: 3 A

Input Voltage $\geq 20 \text{ V}$

$$L_1 = 20 \mu\text{H} (\pm 20 \%)$$

R_{CL} berechnen:

$$R_{CL} = \frac{100 \text{ mV}}{I_{Lim}} = \frac{100 \text{ mV}}{3 \text{ A}} = 33.3 \text{ m}\Omega \quad (\text{A.22})$$

$$P_{CL} = I_{Lade}^2 \cdot R_{CL} = 3^2 \text{ A}^2 \cdot 33 \text{ m}\Omega = 0.297 \text{ W} \quad (\text{A.23})$$

$R_{CL} = 33 \text{ m}\Omega (1\%, 0.5 \text{ W})$ aus E 48

R₁, R₂ und R₃ für 22.2 V Akku berechnen:

Bei den in Abbildung A.12 markierten Spannungen von 22.5 V und 21 V besitzt der Akku noch eine Restkapazität von 60 % bzw. 20 %. Mit diesen Werten werden die Widerstände berechnet. R₃ wird wieder mit 1 M Ω (1 %) bestimmt. Da R₃, U₂₃ und U_{Akku} bekannt sind, können die fehlenden Widerstände berechnet werden:

$$R_2 = \frac{5 \text{ V}}{21 \text{ V}} \cdot \left(\frac{22.5 \text{ V}}{5 \text{ V}} \cdot 1 \text{ M}\Omega - 1 \text{ M}\Omega + 1 \text{ M}\Omega \right) - 1 \text{ M}\Omega = 71.43 \text{ k}\Omega \quad (\text{A.24})$$

$$R_1 = \frac{22.5 \text{ V}}{5 \text{ V}} \cdot 1 \text{ M}\Omega - 71.5 \text{ k}\Omega - 1 \text{ M}\Omega = 3.429 \text{ M}\Omega \quad (\text{A.25})$$

$R_1 = 3.48 \text{ M}\Omega (1\%)$ aus E48

$R_2 = 71.5 \text{ k}\Omega (1\%)$ aus E48

$R_3 = 1 \text{ M}\Omega (1\%)$ aus E48

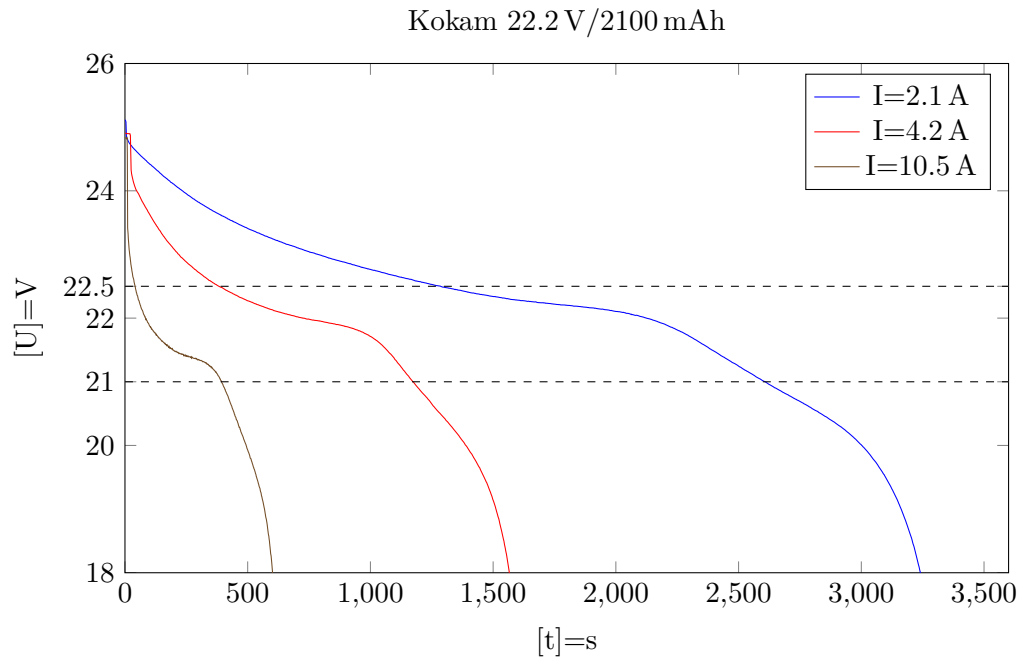


Abbildung A.12.: Entladekennlinie des Kokam 22.2 V/2100 mAh

A. Anhang

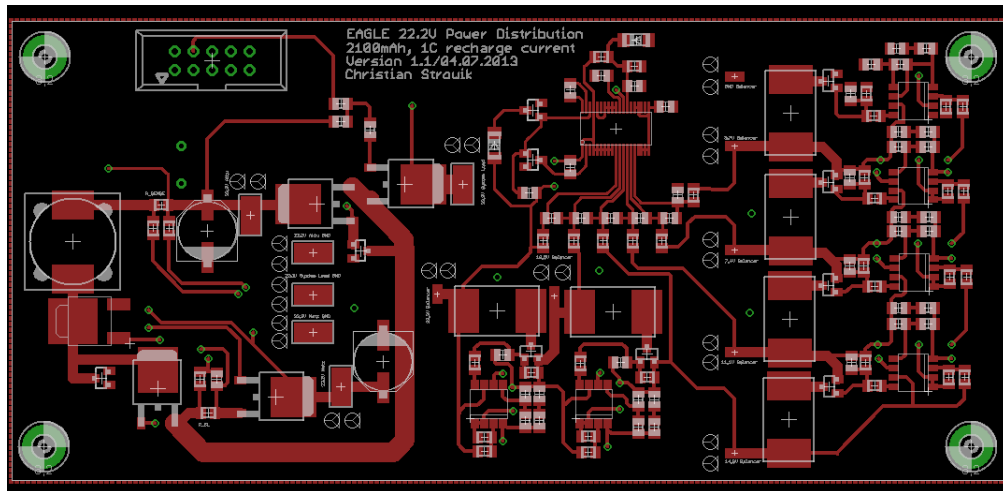


Abbildung A.13.: Top-Layer der 22.2 V-Turbinen-Platine

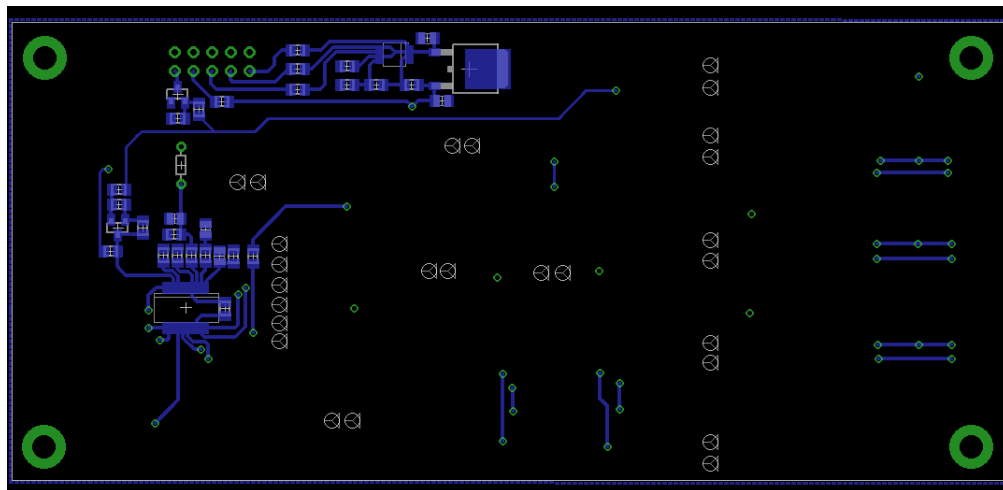
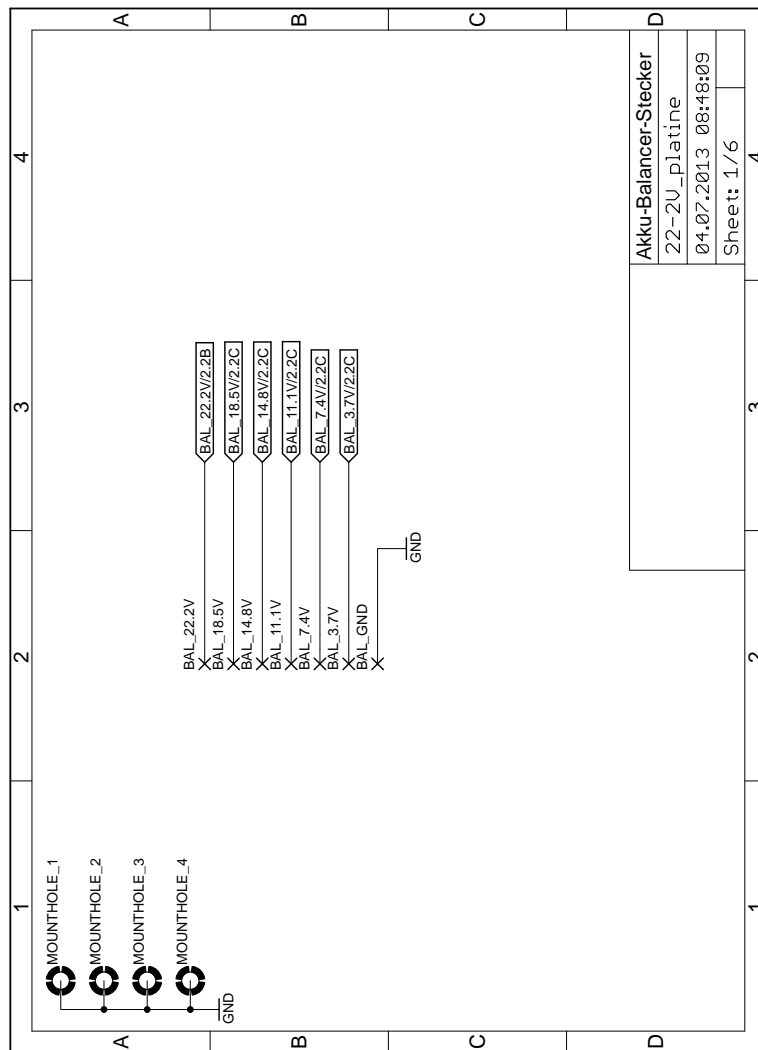
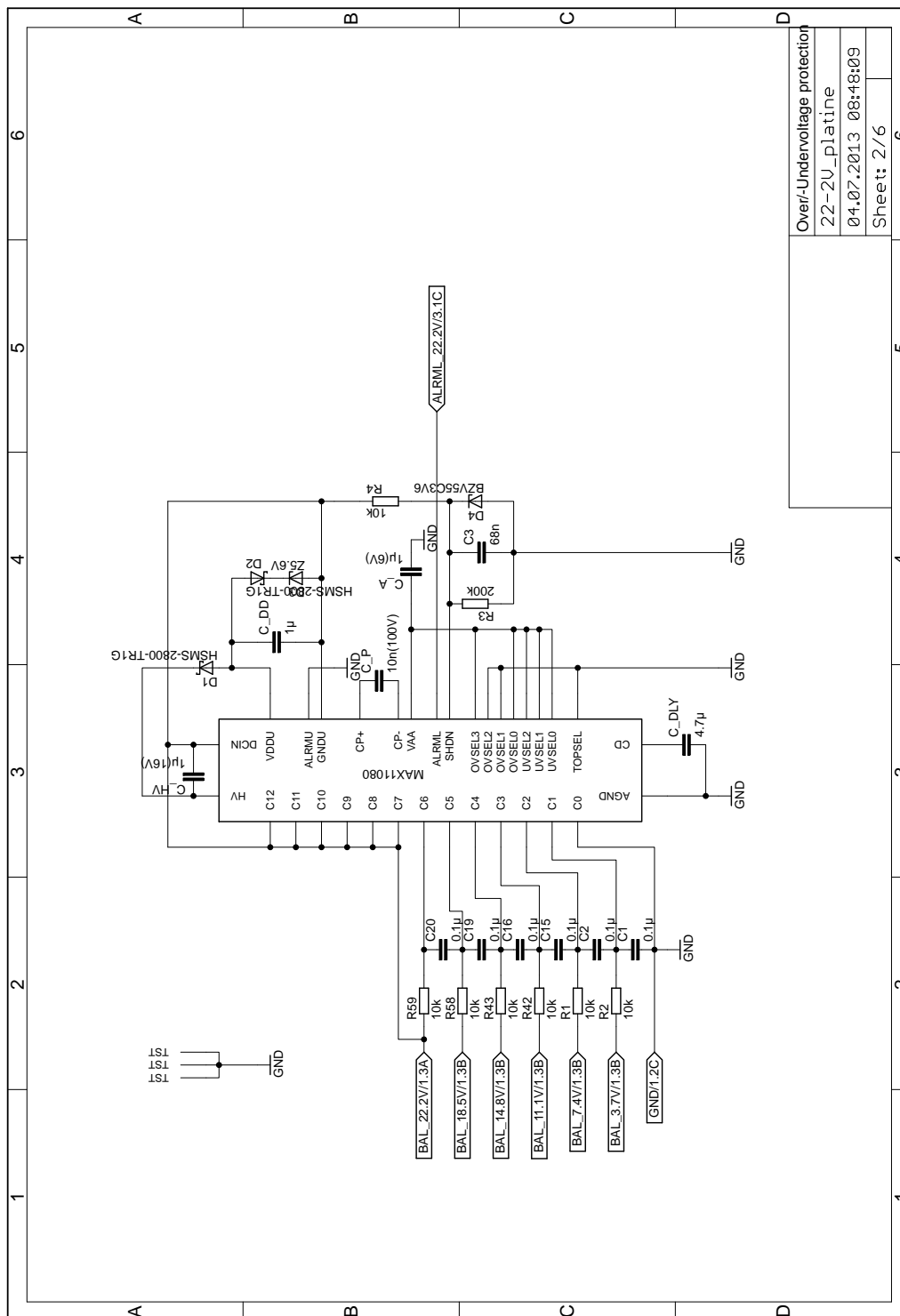
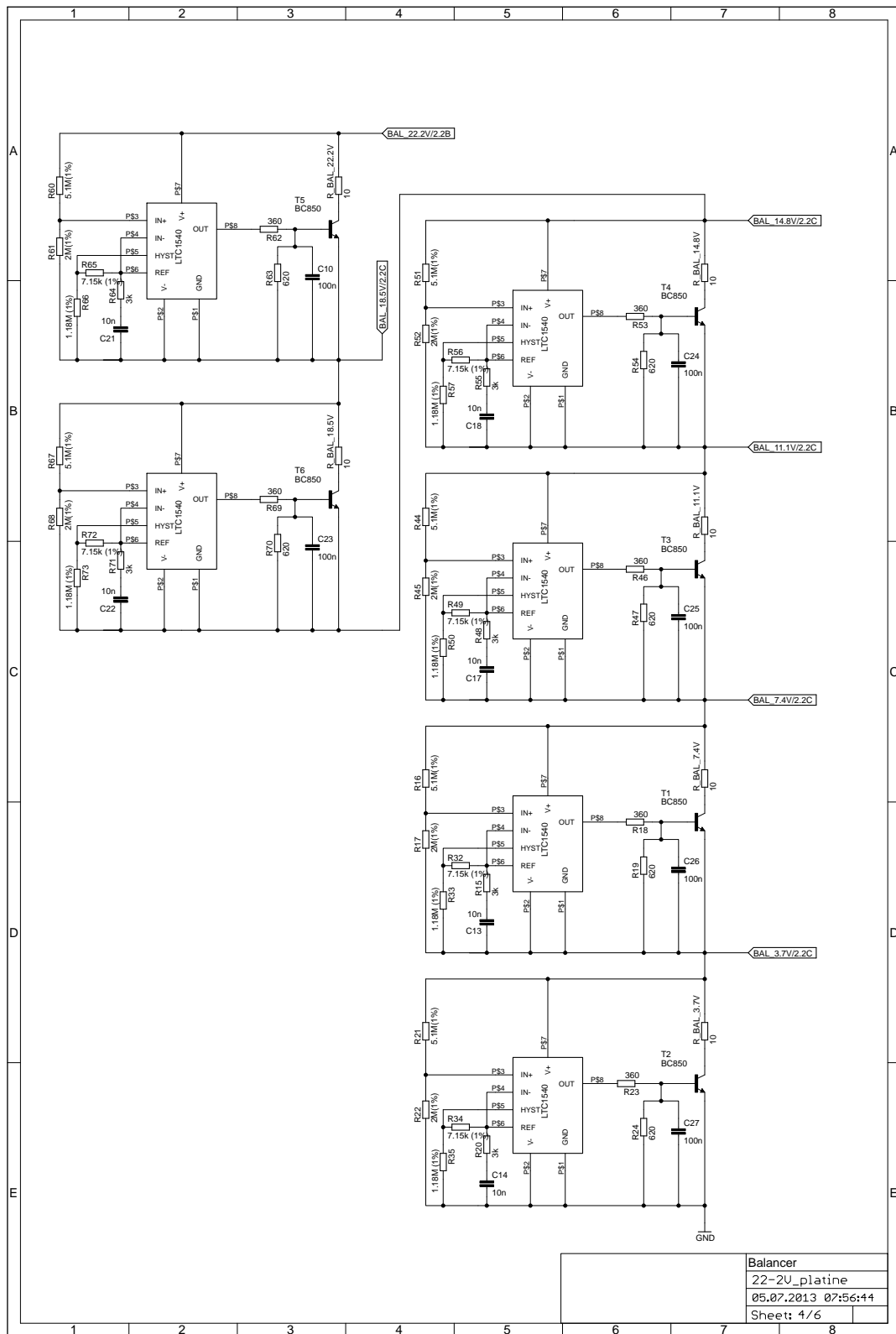


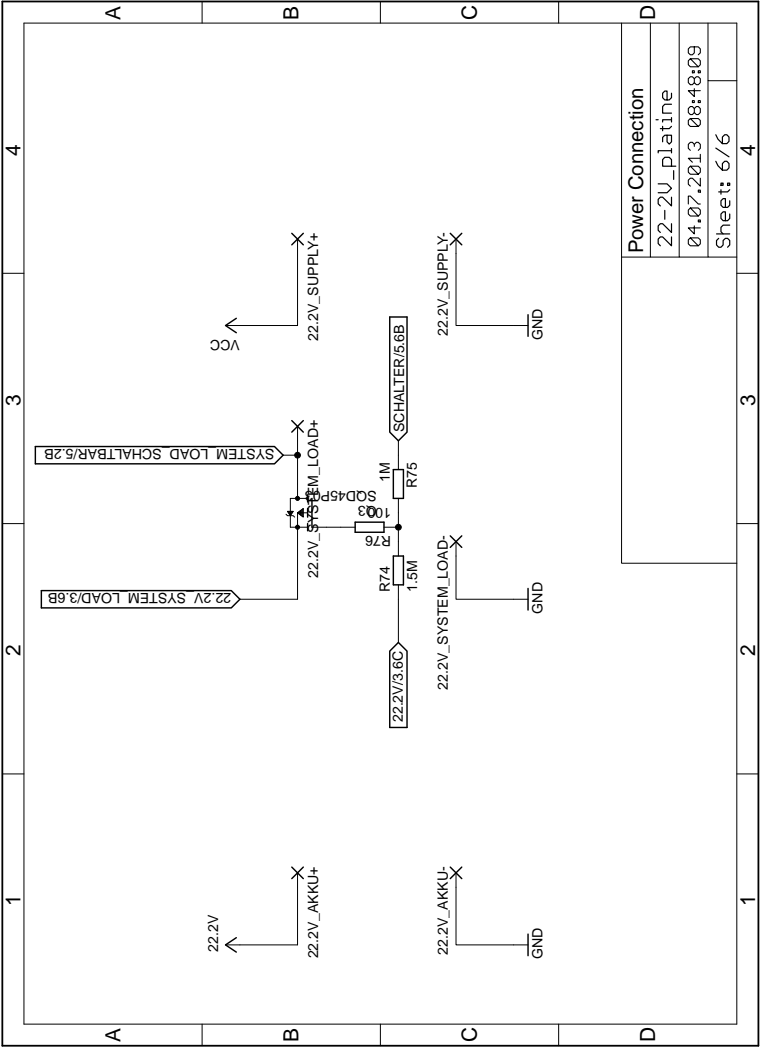
Abbildung A.14.: Bottom-Layer der 22.2 V-Turbinen-Platine





Over-/Undervoltage protection	
22-2U_platine	
04.07.2013 08:48:09	
Sheet: 2/6	6





A.5. 33.3 V Platine

R₁, R₂ und R₃ für 33.3 V Akku berechnen:

Bei den in Abbildung A.16 markierten Spannungen von 34.4 V und 33.4 V besitzt der Akku noch eine Restkapazität von 60 % bzw. 20 %. Mit diesen Werten werden die Widerstände berechnet. R₃ wird wieder mit 1 MΩ(1 %) bestimmt. Da R₃, U₂₃ und U_{Akku} bekannt sind, können die fehlenden Widerstände berechnet werden:

$$R_2 = \frac{5 \text{ V}}{33.4 \text{ V}} \cdot \left(\frac{34.4 \text{ V}}{5 \text{ V}} \cdot 1 \text{ M}\Omega - 1 \text{ M}\Omega + 1 \text{ M}\Omega \right) - 1 \text{ M}\Omega = 29.94 \text{ k}\Omega \quad (\text{A.26})$$

$$R_1 = \frac{34.4 \text{ V}}{5 \text{ V}} \cdot 1 \text{ M}\Omega - 30.1 \text{ k}\Omega - 1 \text{ M}\Omega = 5.85 \text{ M}\Omega \quad (\text{A.27})$$

R₁ = 5.9 MΩ(1 %) aus E48

R₂ = 30.1 kΩ(1 %) aus E48

R₃ = 1 MΩ(1 %) aus E48

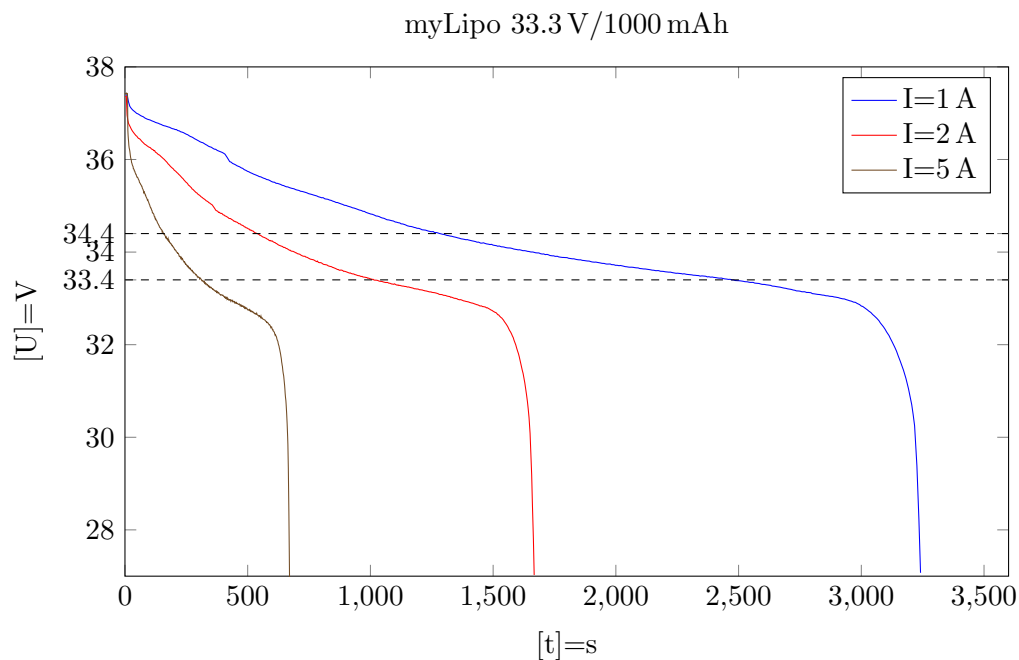


Abbildung A.16.: Entladekennlinien des myLipo 33.3 V/1000 mAh

A. Anhang

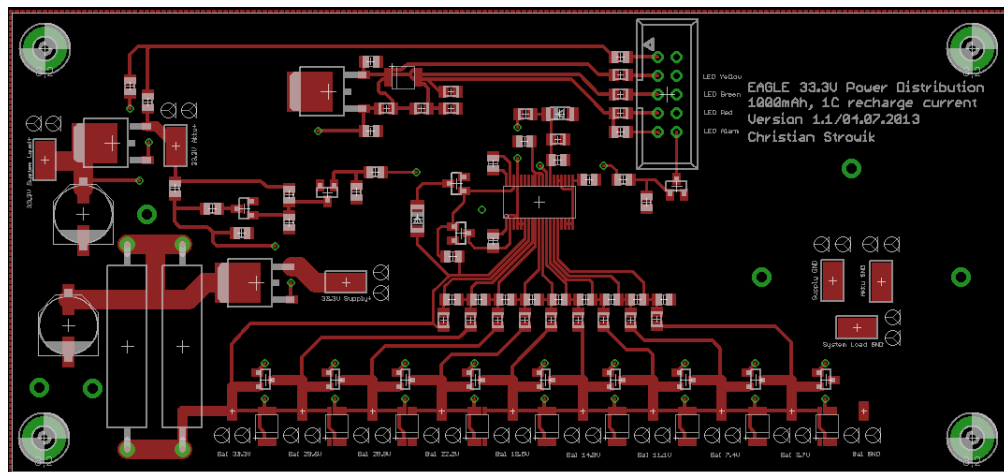


Abbildung A.17.: Top-Layer der 33.3 V-Platine

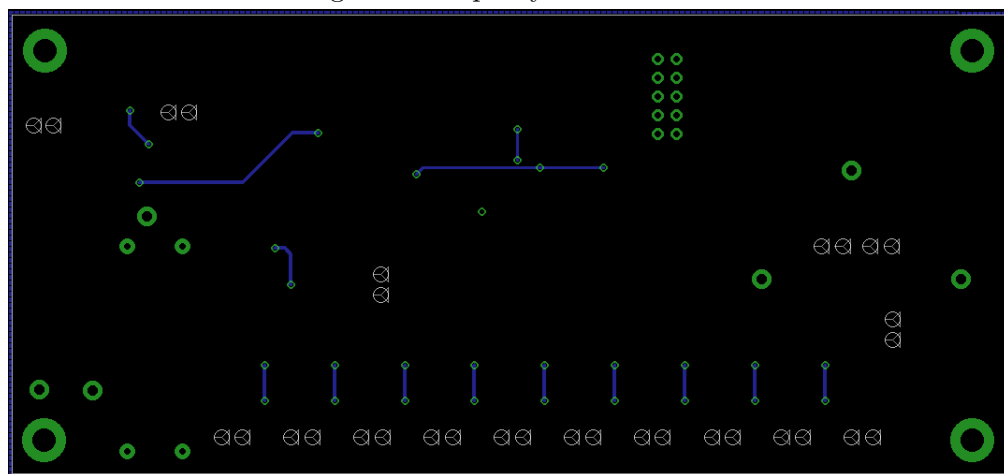
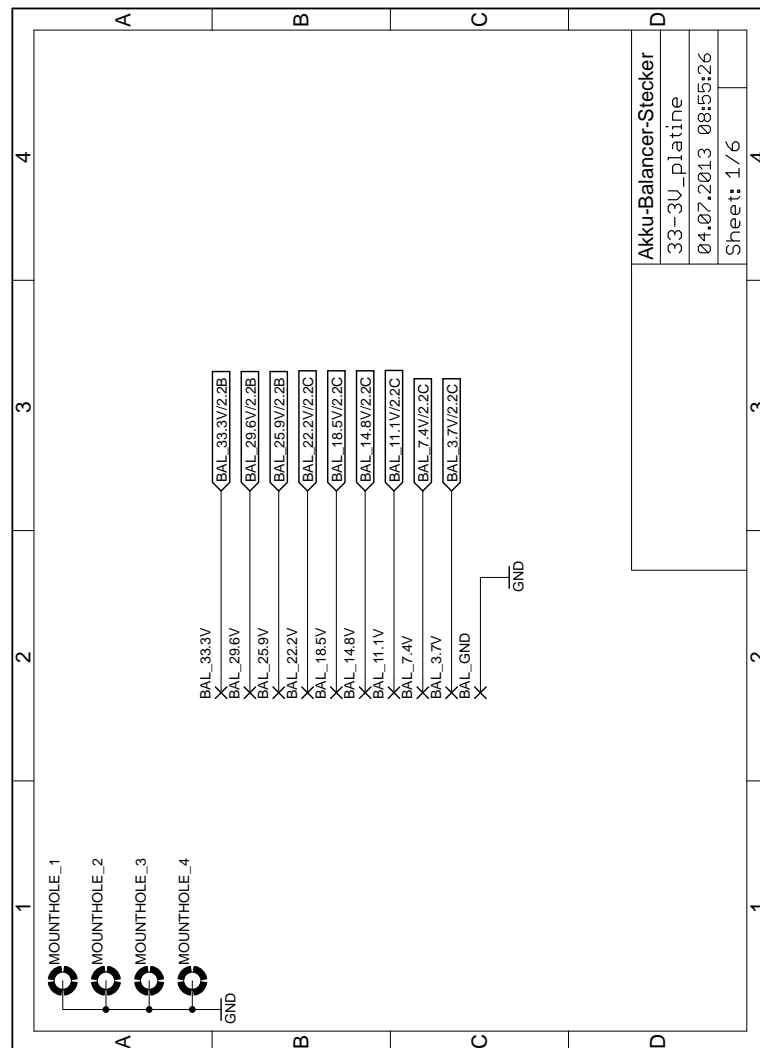
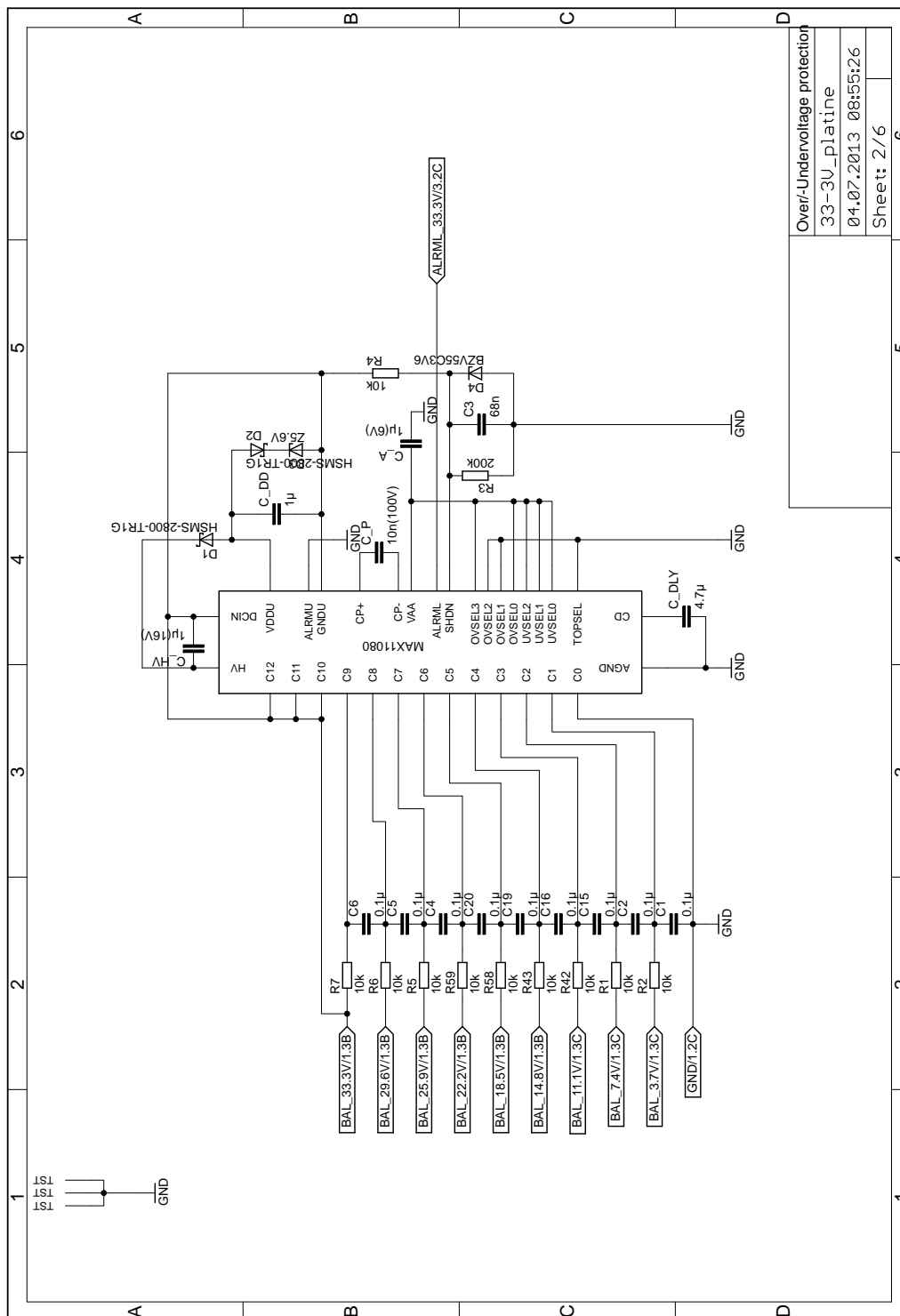
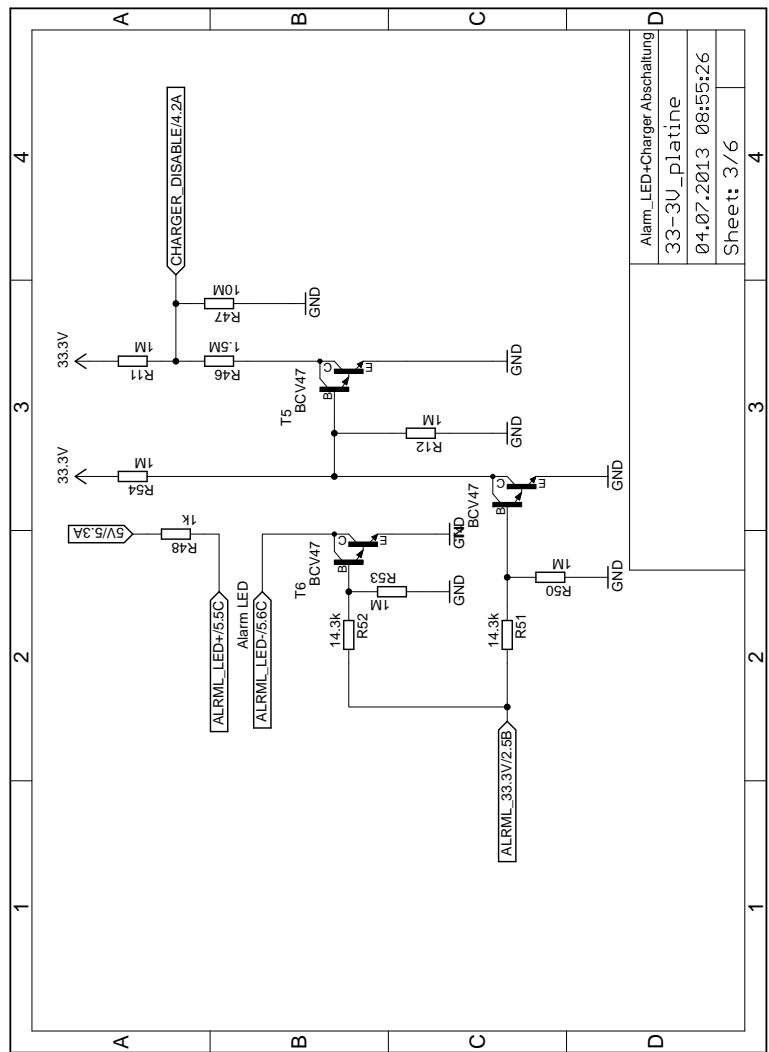


Abbildung A.18.: Bottom-Layer der 33.3 V-Platine







Alarm_LED+Charger Abschaltung	
33-3U_platine	
04.07.2013 08:55:26	
Sheet: 3/6	

